

VŠB-Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Vlastnosti zemin upravených vápnem a hydraulickými
silničními pojivy

Properties of soils treated by lime or hydraulic road binders,
comparison of properties of soils before and after treatment in
construction “Road I/11 Ostrava – the Rudná enlargement”

Student:

Bc. Vít Horáček

Vedoucí diplomové práce:

Doc. RNDr. František Kresta, Ph.D.

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Vít Horáček

Studijní program:

N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor:

3607T021 Stavební hmoty a diagnostika staveb

Téma:

Vlastnosti zemin upravených vápnem a hydraulickými silničními pojivy
Properties of soils treated by lime or hydraulic road binders, comparison
of properties of soils before and after treatment in construction "Road I/11
Ostrava – the Rudná enlargement"

Zásady pro vypracování:

Úprava zemin pojivy patří ke standardním technologiím a vede k optimálnímu využití zemin na stavbách. Vedle vápna se v poslední době úspěšně používají hydraulická silniční pojiva. Práce bude zaměřena na porovnání fyzikálně-mechanických vlastností zemin upravených vápnem a hydraulickými silničními pojivy na stavbě "Silnice I/11 Ostrava – Prodloužená Rudná" s vlastnostmi zemin před úpravou. Bude provedeno kritické zhodnocení vlivu množství pojiva na výsledné vlastnosti upravené zeminy a vyhodnocen přístup k volbě typu pojiva pro úpravu jednotlivých geotechnických typů zemin.

Seznam doporučené odborné literatury:

Rogers C.D.F. – Glendinning S. – Dixon N. (1996): Lime Stabilisation.- Thomas Telford Publishing London
Lindh P. (2004): Compaction - and strength properties of stabilised and unstabilised fine-grained tills.-
Doctoral thesis, Lund University, Lund.

Little D. (1987): Fundaments of the stabilisation of soils with lime.- National Lime Association Bulletin, No. 332, London.

Soil treatment with lime and/or hydraulic binders. Application to the construction of fills and capping layers. Technical Guide. LCPC Paris. 2004.

TP 94 Úprava zemin, 2013.

ČSN EN 14 227-11 Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 11: Zeminy upravené vápnem, 2008.

ČSN EN 14 227-13 Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 13: Zeminy upravené hydraulickými silničními pojivy, 2008.

ČSN EN 14 227-14 Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 14: Zeminy upravené popílkem, 2008.

ČSN EN 13 242+A1 Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace, 2008.

ČSN EN 13282-1 Hydraulická silniční pojiva - Část 1: Rychle tvrdnoucí hydraulická silniční pojiva – Složení, specifikace a kritéria shody, 2013.

ČSN prEN 13282-2 Hydraulická silniční pojiva - Část 2: Normálně tvrdnoucí hydraulická silniční pojiva – Složení, specifikace a kritéria shody, 2013.

ČSN 72 1006 Kontrola zhutnění zemin a sypanin, 1999.

ČSN 72 1191 Zkoušení míry namrzavosti zemin, 2013.

ČSN 73 6133 Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací, 2010.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. RNDr. František Kresta, Ph.D.**

Datum zadání: 28.02.2015

Datum odevzdání: 30.11.2015

Ing. Libor Židek
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji:

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠBTUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

ANOTACE

HORÁČEK, Vít. *Vlastnosti zemin upravených vápnem a hydraulickými silničními pojivy*. Diplomová práce. 71 s.

Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, 2015.

Diplomová práce se zabývá vlastnostmi zemin upravených vápnem a hydraulickými silničními pojivy. První část popisuje základní vlastnosti zemin a obecné zákonitosti spojené s metodou úpravy zemin. Jsou zde uvedena nejčastěji používaná pojiva a vhodnost jejich použití. Rovněž je popsán způsob ověřování vlastností upravených zemin. V metodické části je popsán způsob vyhodnocení třetí - experimentální části, která se zaměřuje na provedení návrhu úpravy zemin v aktivní zóně a s ním spojená specifika.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zemina, úprava zemin, hydraulická silniční pojiva, míra zhutnění, přímá metoda, nepřímá metoda.

ABSTRACT

HORÁČEK, Vít. *Properties of soils treated by lime or hydraulic road binders, comparison of properties of soils before and after treatment in construction “Road I/11 Ostrava – the Rudná enlargement”*. Master thesis. 71 s.

Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, 2015.

Thesis concerns with soil treatment with lime and hydraulic road binders. The first part describes the basic properties of soils and general principles associated with the method of soil treatment. There are the most commonly used binders and their suitability. Thesis describes also a method of verifying the characteristics of soil treatment. The methodological section describes how to evaluate third experimental section, which focuses on design of soil treatment from active zone and associated issues.

KEYWORDS

Soil, soil treatment, hydraulic road binders, rate of concretion, direct method, indirect method

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	8
1. Úvod.....	9
2. Teoretická část.....	10
2.1 Vlastnosti neupravených zemin obecně	10
2.1.1 Zrnitost zeminy	10
2.1.2 Použitelnost zemin a jejich vhodnost k úpravě.....	12
2.2 Úprava zemin pojivy	14
2.2.1 Úprava zemin vápnem	14
2.2.2 Úprava zemin hydraulickými silničními pojivy	15
2.2.3 Technologický popis prací při provádění úprav zeminy.....	16
2.3 Zkoušení upravených zemin.....	17
3. Metodická část.....	19
3.1. Zhutňovací zkouška.....	20
3.1.1 Příprava zhutňovací zkoušky	23
3.2 Popis prováděných laboratorních měření	24
3.2.1 Statická zatěžovací zkouška.....	25
3.2.2 Geodetická kontrolní metoda	27
3.2.3 Stanovení objemové hmotnosti membránovým objemoměrem	28
3.2.4 Proctorova zkouška	29
3.2.5 Radiometrické určení parametrů míry zhutnění	31
3.2.6 Rázová zatěžovací zkouška lehkou dynamickou deskou.....	33
3.2.7 Kalifornský poměr únosnosti – zkouška CBR.....	35
4. Experimentální část	36
4.1 Silnice I/11 Prodloužená Rudná – poznatky z geotechnického průzkumu	37
4.2 Zhutňovací zkouška č. 1	37
4.2.1 Program a realizace zhutňovací zkoušky	37
4.2.2 Výsledky provedených měření – geodetická kontrolní metoda.....	39
4.2.3 Výsledky provedených měření – výsledky Proctorovy zkoušky	41

4.2.4 Výsledky provedených měření – stanovení objemové hmotnosti membránovým objemoměrem	41
4.2.5 Výsledky provedených měření – radiometrické určení parametrů zhutnění	43
4.2.6 Výsledky provedených měření – rázová zatěžovací zkouška lehkou dynamickou deskou	45
4.2.7 Výsledky provedených měření – statická zatěžovací zkouška	46
4.2.8 Výsledky provedených měření – porovnání přímých a nepřímých metod parametrů zhutnění.....	47
4.2.9 Zhutňovací zkouška č. 1 – závěr.....	51
4.3 Zhutňovací zkouška č. 2.....	51
4.3.1 Realizace zhutňovací zkoušky č. 2	51
4.3.2 Výsledky provedených měření – geodetická kontrolní metoda.....	52
4.3.3 Výsledky provedených měření – výsledky Proctorovy zkoušky	53
4.3.4 Výsledky provedených měření – stanovení objemové hmotnosti membránovým objemoměrem	54
4.3.5 Výsledky provedených měření – radiometrické určení parametrů zhutnění	55
4.3.6 Výsledky provedených měření – rázová zatěžovací zkouška lehkou dynamickou deskou	56
4.3.7 Výsledky provedených měření – statická zatěžovací zkouška	57
4.3.8 Výsledky provedených měření – porovnání přímých a nepřímých metod parametrů zhutnění.....	58
4.3.9 Zhutňovací zkouška č. 2 – závěr.....	61
4.4 Porovnání výsledků zhutňovacích zkoušek.....	61
4.4.1 Ekonomické srovnání obou návrhů	62
5. Závěr.....	63
Seznam použité literatury a informačních zdrojů	66
Seznam použitých obrázků.....	68
Seznam použitých tabulek.....	69
Seznam příloh:.....	71

Seznam použitých zkratek a symbolů

CBR	Kalifornský poměr únosnosti
CE	jíl s extrémně vysokou plasticitou
CG	jíl štěrkovitý
CH	jíl s vysokou plasticitou
CI	jíl se střední plasticitou
CL	jíl s nízkou plasticitou
GM	štěrk hlinitý
CS	jíl písčitý
CV	jíl s velmi vysokou plasticitou
GC	štěrk jílovitý
GP	štěrk špatně zrněný
GW	štěrk dobře zrněný
G-F	štěrk s příměsí jemnozrnné zeminy
IBI	okamžitý poměr únosnosti
I_c	stupeň konzistence
ME	hlína s extrémně vysokou plasticitou
MG	hlína štěrkovitá
MH	hlína s vysokou plasticitou
MI	hlína se střední plasticitou
ML	hlína s nízkou plasticitou
MS	hlína písčitá
MV	hlína s velmi vysokou plasticitou
PS	Proctor standard
SC	písek jílovitý
SP	písek špatně zrněný
SM	písek hlinitý
SW	písek dobře zrněný
S-F	písek s příměsí jemnozrnné zeminy
W_l	mez tekutosti
w_n	přirozená vlhkost
$\rho_{d,max. PS}$	maximální objemová hmotnost zeminy dle zkoušky Proctor standard

1. Úvod

S rostoucími nároky na mechanicko-fyzikální vlastnosti zemin a při současné snaze minimalizace ekonomických a ekologických zátěží se úprava zemin pojivy stala běžnou technologií používanou na stavbách. Při provádění zemních prací je výhodné použít zeminu, která se nachází přímo na stavbě. Upravené zeminy vykazují lepší smykové pevnosti a pevnosti v tlaku, rovněž se zlepšuje zpracovatelnost zemin, jejich odolnost vůči klimatickým vlivům. I přes pozitivní zkušenosti nelze jednotlivé metody úpravy zemin pojivy označit jako univerzální. Různorodé vlastnosti zemin, především její zrnitost a vlhkost, vedou k hledání optimálního návrhu úpravy zemin, zejména pak k typu a množství nejvhodnějšího pojiva. Na stavbách dopravní infrastruktury je nutné stále sledovat charakter neupravené zeminy. Použití různých druhů pojiv je naprosto běžnou praxí. Stanovení nejvhodnějšího návrhu je občas velmi náročné a jistotu dodají až ověřovací poloprovozní zkoušky.

Touto diplomovou prací navazuji na svoji bakalářskou práci, která se věnovala obecným zákonitostem úpravy zemin vápnem a hydraulickými silničními pojivy. V diplomové práci se zabývám porovnáním mechanicko-fyzikálních vlastností zemin upraveným vápnem nebo hydraulickými silničními pojivy s vlastnostmi zeminy před úpravou. Experimentální část je věnována návrhu úpravy zeminy a následnému ověření vlastností upravené zeminy v aktivní zóně zářezu v rámci stavby „Silnice I/11 – Prodloužená Rudná“.

[1]



Obrázek 1: Zemní fréza Wirtgen WR2000 [0]

2. Teoretická část

2.1 Vlastnosti neupravených zemin obecně

Jak již bylo uvedeno v úvodu, vlastnosti zemin bývají často rozdílné. Není žádnou výjimkou, když se na stavbě mění i na malých úsecích v řádech několika metrů. Zeminy jsou popisovány širokou škálou mechanických a fyzikálních vlastností. Při stavbách zemních těles pozemních komunikací je nejpodstatnější klasifikace vedoucí k zatřídění zeminy. Dále se sleduje především vlhkost zeminy, plasticita, objemová hmotnost a další vlastnosti.

2.1.1 Zrnitost zeminy

Základním klasifikačním znakem je zrnitostní složení zemin. Zrnitost zemin je základním parametrem pro pojmenování a zatřídění zemin. Zrnitost rozhoduje o použití zemin do zemního tělesa a jejich vhodnosti k úpravě. Zrnitostní složení zeminy je rovněž významným vodítkem pro určení vhodného pojiva. [12]

Granulometrickým složením zeminy se rozumí podíl jejích složek v procentech hmotnosti suché zeminy. Zrnitostní složení zeminy se nejčastěji zjišťuje pomocí síťového rozboru, platí pro zrna většího průměru než 0,06 mm. Pro zrna průměru menšího než 0,06 mm se zrnitost stanovuje hustoměrnou metodou. Výstup měření se znázorňuje graficky křivkou zrnitosti. Vlastnosti zemin jsou podstatněji ovlivňovány podílem jemné frakce, než frakce hrubé. [10][12]

Zrna dělíme podle velikosti:

- štěrk – 63 mm až 2 mm
- písek – 2 mm až 0,063 mm
- jemnozrná zemina – menší než 0,063 mm

Podle velikosti částic se rozlišují tyto složky (viz příloha A ČSN 73 6133):

Částice	Popis	Označení	Rozsah
Velmi hrubé	balvanitá složka	B	> 200 mm
	kamenitá složka	cb	60 mm až 200 mm
Hrubé	šterková složka	g	2 mm až 60 mm
	písčítá složka	s	0,06 mm až 2 mm
Jemné (f)	hlinitá složka	m	0,002 mm až 0,6 mm
	jílová složka	c	< 0,002 mm
Velmi hrubé částice se při zatřídování vyjmou, zaznamená se jejich hmotnostní podíl. Zbytek zeminy se klasifikuje podle dalších hledisek.			

Tabulka 1: Rozdělení složek podle velikosti zrn [10]

V tabulce 2 je uvedeno rozdělení výchozích skupin zeminy dle ČSN 73 6133.

Výchozí skupina	Název	Symbol	Kvalitativní znaky
Jemnozrnná	Jemnozrnná zemina	F (jíl – C, hlína M)	$f > 35\% (g + s + f)$
Písčítá	Písek	S	$f < 35\% (g + s + f) \wedge s > g$
Šterkovitá	Šterk	G	$f < 35\% (g + s + f) \wedge g > s$
POZNÁMKA: Symbol tvoří základ názvu zeminy a stojí na prvním místě v 1. Pádu. Doplnující písmeno tvoří přívlastek názvu. Např. S – písek, S-F – písek s příměsí jemnozrnné zeminy, SC – písek jílovitý.			

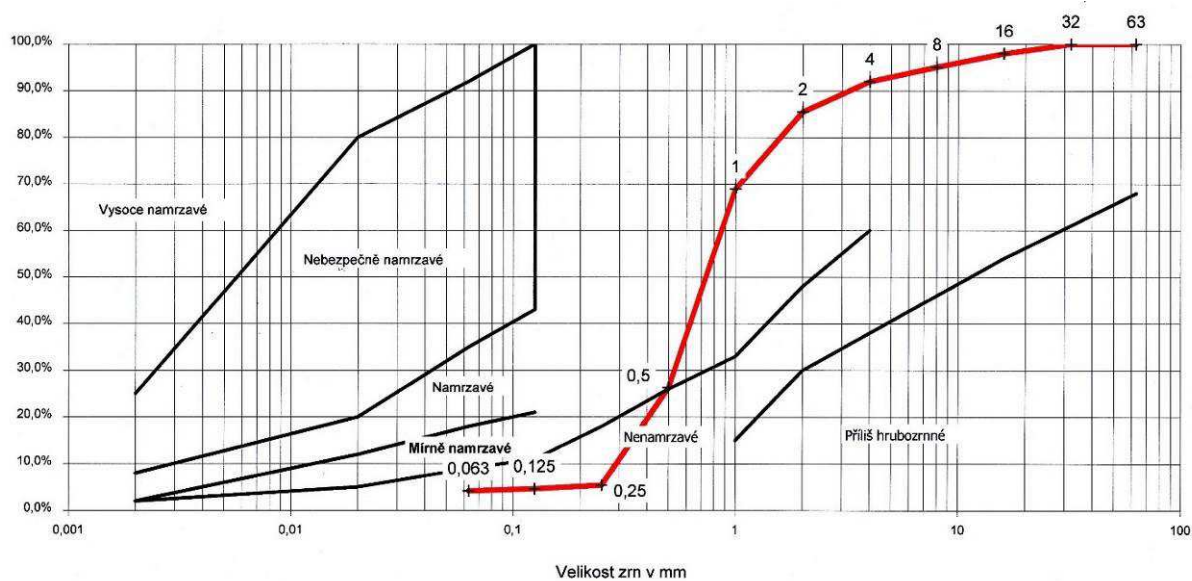
Tabulka 2: Výchozí rozdělení skupin zeminy [10]

Z křivky zrnitosti lze odhadnout základní parametry zeminy, náchylnost k promrzání, zhutnitelnost a podobně.

Na křivce zrnitosti se určují charakteristické průměry zrn d_{10} , d_{30} , d_{60} . Jsou to průměry zrn odpovídající 10%, 30% a 60% propadu na křivce zrnitosti. Zrno d_{10} je považováno za efektivní zrno. [10][12]

Číslo nestejnozrnnosti $C_u = \frac{d_{10}}{d_{60}}$ popisuje zeminy z hlediska rozložení frakcí na křivce zrnitosti.

- $C_u < 5$ zemina stejnozrnná
- $C_u = 5-15$ zemina středně nestejnozrnná
- $C_u > 15$ zemina nestejnozrnná



Obrázek 2: Křivka zrnitosti [0]

2.1.2 Použitelnost zemin a jejich vhodnost k úpravě

Zeminy se z hlediska použitelnosti orientačně dělí dle tab. 1 ČSN 73 6133 na nepoužitelné, nevhodné k přímému použití, podmíněčně vhodné a vhodné (tabulka 3). Použitelnost do zemních těles se posuzuje podle skutečných vlastností následujícím způsobem:

- Jestliže $W_l > 50 \%$ nebo $I_c \leq 0,5$, nebo $\rho_{d,max. PS} < 1500 \text{ kg/m}^3$ (násyp), zeminy se musí upravit;

$\rho_{d,max. PS} < 1600 \text{ Kg/m}^3$ (aktivní zóna), musí se zemina upravit.

- Musí se upravit objemově nestabilní zeminy a horniny, u nichž bude za běžných klimatických podmínek docházet k objemovým změnám větším než 3 %.
- Pokud zeminu nelze zpracovat, protože přirozená vlhkost w_n není v intervalu přípustné vlhkosti a tuto vlhkost nelze ovlivnit, popřípadě se jedná o zeminu stejnozrnnou, zemina se musí upravit. [10]

	Nepoužitelné ¹⁾ k jakémukoli použití	Nevhodné k přímému použití bez úpravy	Podmínečně vhodné k přímému použití bez úpravy	Vhodné k přímému použití bez úpravy
Podmínky použití	Nelze upravit běžnými technologiemi, použití se zpravidla vylučuje	Musí se vždy upravit ³⁾	Podle dalších vlastností se rozhodne, zda lze použít přímo bez úpravy nebo zda se musí upravit	Lze použít přímo bez úpravy
Aktivní zóna	Organické látky s obsahem organických látek větším než 6 % ²⁾ , bahna, rašelina, humus, ornice CE, ME ³⁾	ML, MI, CL, CI MH, MV, CV, CH,	S-F MG, CG, MS, CS, SP, SM, SC, GP, GM, GC	SW, GW G-F
Násyp		MH, MV, CV, CH	MG, CG, MS, CS, SP, SM, SC, GP, GM, GC, ML, MI, CL, CI	SW, GW G-F S-F
1) Netýká se podloží násypů a svahů zářezů 2) Obsah 6 % je hranice pro středně organické zeminy dle ČSN EN ISO 14688-2 3) Neplatí pro poddajnou vrstvu vrstevnatého násypu				

Tabulka 3: Použitelnost zemin pro stavbu zemního tělesa [10]

V zemním tělese se k úpravě převážně používají zeminy nevhodné k přímému použití nebo zeminy podmíněčně vhodné k přímému využití. Obecně však platí, že upravovat lze všechny druhy zemin. Možnosti úpravy jsou omezeny pouze kapacitami technologických zařízení a ekonomickým hlediskem ve srovnání s jinými možnostmi. [13]

Úpravu zemin ovlivňuje mj. chemické složení zemin. Některé chemické látky obsažené v zeminách mohou způsobovat reakce s pojivem a ovlivňovat tak výsledky úpravy. Organické látky například využívají část pojiva k neutralizaci a zvyšují tím spotřebu pojiv. Maximálním přípustným obsahem organickým látek je 6 %. Chloridy v zemině způsobují bobtnání. Stejně tak mohou působit sulfáty a sulfidy (SO_4^{2-} , S^{2-}) ve vyšším než 1,5% množství. Dusičnany a fosfáty zpomalují hydrataci. Tyto látky se do zemin mohou dostat např. prostřednictvím nadměrného hnojení hospodářské půdy. [13]

2.2 Úprava zemin pojivy

Problematika úprav zemin má bohatou historii už od starověku. Moderní boom přinesla snaha o vytvoření moderních sítí infrastruktury po druhé světové válce. Zeminy lze upravovat nejrůznějšími způsoby. Kupříkladu mechanickým upravením křivky zrnitosti příměsí jiných materiálů (popílek, zemina s odlišnou granulometrií), nebo tzv. mikrovyztužováním (mísení zemin s malým množstvím textilních vláken). V našem případě se budeme zabývat výlučně úpravou zemin pomocí pojiv. [13][16]

Použití pojiv je nejefektivnější a mění vlastnosti zemin okamžitě. Svým působením snižují přirozenou vlhkost a plasticitu a zvyšují únosnost zeminy a její zpracovatelnost, což ověřují poznatky z mé bakalářské práce (viz HORÁČEK, Vít. *Úprava zemin vápnem a hydraulickými silničními pojivy*. Ostrava, 2014. Bakalářská práce.)

Použití obou druhů pojiv je velmi podobné, ale nese svá specifika. O použití konkrétního druhu pojiva rozhoduje především zrnitostní složení zeminy a její plasticita. Mezi pojiva patří také popílek a vysokopecní strusku. Jejich použití je však v České republice minimální. [13]

2.2.1 Úprava zemin vápnem

Vápno je v České republice při úpravách zemin zřejmě nejpoužívanějším pojivem. Zkušenosti s tímto pojivem jsou proto největší. Vlastností vápna se využívá především při úpravách jemnozrnných zemin střední plasticity, kam patří spraše a sprašové hlíny. Nejčastěji se využívá vápno ve formě vzdušného vápna (CaO), ale výjimkou není ani použití vápenného hydrátu (Ca(OH)_2). [6][13][16]

Pro reakci vápna se zeminou je důležitá přítomnost jílových minerálů, které při reakci s vápnem vyvolávají kationtovou výměnu. Při této fázi v krystalové struktuře jílu volné ionty Ca^{2+} nahrazují ionty sodíku (Na^+) a draslíku (K^+). Díky tomuto procesu se typická vrstevnatá struktura jílových materiálů mění na zrnitou. Zároveň se okamžitě snižuje vlhkost zeminy působením hydratačního tepla, kdy se část vody vypaří a samotným mísením suchého vápna

s vlhkou zeminou. Přídavek 1 % vápna snižuje vlhkost asi o 1-2 % v závislosti na klimatických podmínkách. Současně dochází k zvyšování meze plasticity, pevnosti zeminy, roste CBR a klesá namrzavost zeminy. Všechny tyto změny působí poměrně rychle (do 24 hodin). Další změny v zemině následují po dobu několika let. Materiál je pevnější a nadále dochází k růstu hodnot únosnosti CBR. [2][13][19]

Vlastnost zeminy	Působení	Příměs vápna	Příměs
Vlhkost	snižuje	1 – 2 %	0,2 – 0,4 %
Maximální objemová hmotnost	snižuje	5 – 100 kg/m ³	6 – 20 kg/m ³
Optimální vlhkost	zvyšuje	0,5 – 2 %	beze změny
Poměr únosnosti CBR na vzorku zhutněnému při zkušební vlhkosti	zvyšuje	5 – 50 % CBR	5 – 15 % CBR
Na vzorku po zrání a následné saturaci	zvyšuje	5 – 50 % CBR	10 – 50 % CBR

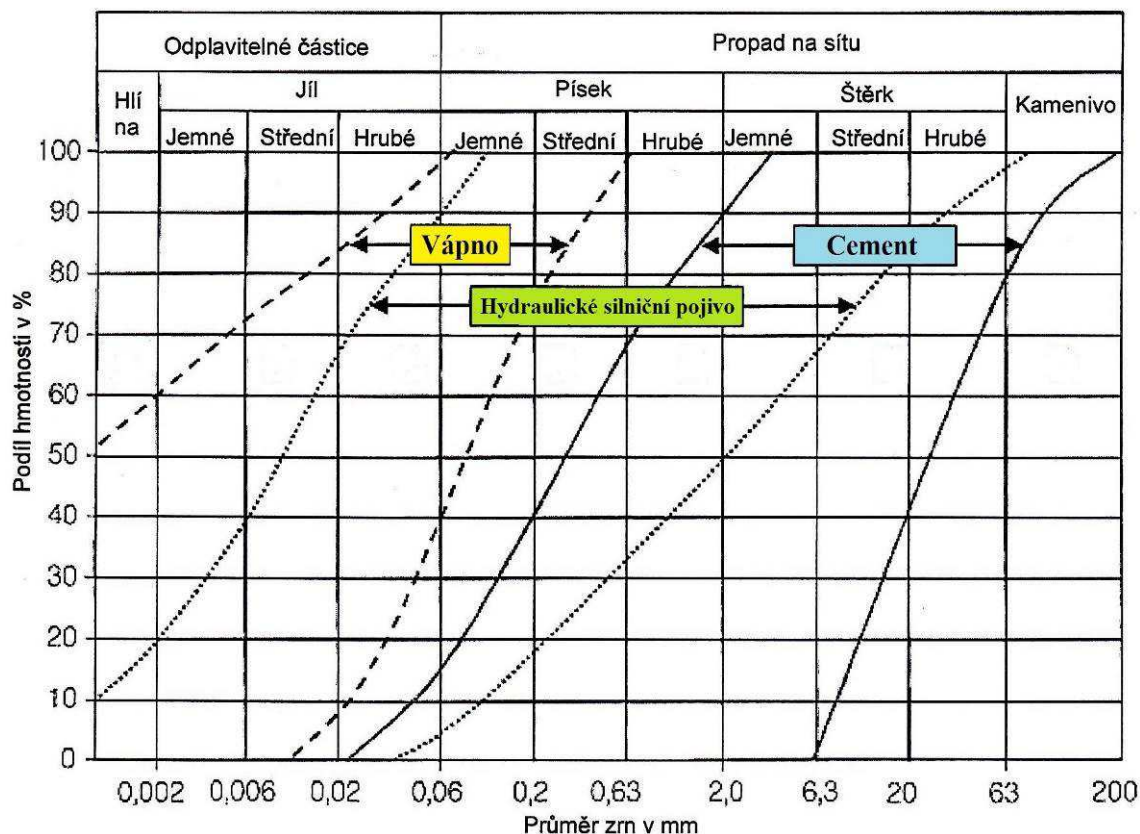
Tabulka 4: Orientační hodnoty změn vlastností zeminy vztahované na 1 % příměsi pojiva [13]

2.2.2 Úprava zemin hydraulickými silničními pojivy

Doba reakce při úpravě zemin je při použití cementu podstatně rychlejší (1 hodina). Cement je obvykle používán u zemin s širokou a hrubou zrnitostí. V souvislosti s použitím cementu je nutné zmínit negativní dopady cementu jako pojiva. Rychlý růst pevnosti u cementu může způsobovat vznik trhlin. Vzhledem k tomu hendikepu byla pro účely úpravy zemin vyvinuta speciální hydraulická silniční pojiva. Tato pojiva negativní účinky cementu minimalizují. Jedná se pojiva vyrobená mícháním vápna, cementu, popř. portlandského slínku a různých hydraulických komponent. Přesný obsah složení výrobci z přirozených důvodů neuvádějí. V sousedním Německu existovala již v roce 2005 široká škála hydraulických silničních pojiv. U nás jsou v tomto směru hojně používány výrobky koncernu Cemex Česká republika, a to Georoc Doroport TB25 a Georoc Dorosol. [3][7][13][17]

Doroport je vhodný pro úpravu písčitých a šterkovitých materiálů, zatímco Dorosol je vhodnější pro úpravu zemin s vyšším podílem jemnozrné frakce. Při aplikaci těchto pojiv je nezbytný přídavek vody. [18]

Hydraulická silniční pojiva vyvolávají podobné účinky jako vápno. Dávkování bývá ve srovnání s vápnem obvykle vyšší. Upravený materiál je vysoce únosný, neprská, nenamrzá a navíc je odolný vůči síranům. [3][7][13]



Obrázek 3: Orientační vymezení oblasti zrnitosti pro úpravu zemin. [17]

2.2.3 Technologický popis prací při provádění úprav zeminy

Pracovní postupy se při úpravách zemin shodují, ať už použijeme jako pojivo vápno, cement nebo hydraulická silniční pojiva. Stejně jsou i stroje a zařízení. Je ovšem nutné přihlídnout k faktu, o jaký konstrukční celek zemního tělesa se jedná. Úprava zemin v podloží násypu, násypu či zářezu jistě rozdíly vykazuje. Tomuto tématu jsem se více věnoval ve své bakalářské práci, proto jej nyní nebudu tolik rozvádět. [1]

Veškeré náležitosti týkající se pracovního postupu jsou součástí technologického předpisu, který se pro tyto potřeby vypracovává. Technologický předpis obsahuje povinné údaje o stavbě, stavebním objektu, navržených strojů a mechanizací, popis technologie úpravy

i s jejími specifiky (pokud jsou), popis materiálů, rozsah ověřovacích metod, klimatická omezení a další. [13]

Zeminy se upravují pomocí běžně používaných stavebních strojů, ale i pomocí zařízení k tomuto účelu speciálně určeným. Na mísení zeminy s pojivem se používá zemní fréza, pojivo se dávkuje pomocí speciálního dávkovače, zemina se zpracovává buldozery nebo grejdry a hutní se běžnými zhutňovacími prostředky. [13]

Samotný postup prací probíhá zjednodušeně zhruba tímto způsobem:

- návoz zeminy a její rozprostření a srovnání, případně úprava vlhkosti,
- nadávkování pojiva s přesností $\pm 10\%$,
- mísení zeminy s pojivem,
- hutnění promísené vrstvy.

Mocnost navezené vrstvy se odvíjí od možností zhutňovacích a mísících prostředků. Nejčastěji se volí tloušťka 0,5 m. Dávkování pojiva je poměrně přesné a jeho množství lze ověřit přímo na stroji nebo pomocí vázícího plechu. Zemní fréza je zařízení opatřené rotorem s hydraulikou. Maximální záběr frézy je obvykle 0,5 m. Pokud není smísení zeminy s pojivem dostatečné, nebo vyskytují-li se segregovaná místa či hrudky, je pracovní pojezd opakován. Hutnění promísené vrstvy se provádí ihned po mísení. Počet přejezdů a režim hutnění odpovídá výsledkům zhutňovací zkoušky podle ČSN 72 1006. [13]

2.3 Zkoušení upravených zemin

K ověření vlastností zemin slouží průkazní a kontrolní zkoušky. Průkazní zkoušky začínají již geotechnický průzkumem. Zjišťují se vlastnosti původní zeminy, jejichž výsledky jsou rozhodující při návrhu úpravy zemin. Pro návrh úpravy zemin je nutné znát:

- chemické a mineralogické složení zeminy,
- vlhkost a zrnitost zeminy,
- číslo plasticity,

- zhutnitelnost zeminy podle Proctor standard,
- poměr únosnosti CBR a IBI,
- namrzavost zeminy.

Následně se zeminy ověřují podobně i během úpravy. Přibývá ovšem měření dávkování pojiva, přičemž vlhkost zeminy se měří před i po dávkování pojiva. Zrnitost a číslo plasticity zjišťujeme před dávkování pojiva. Zhutnitelnost PS, IBI a bobtnavost zjišťujeme po nadávkování pojiva. Oprávněnost návrhu se ověřuje zhutňovací zkouškou dle ČSN 72 1006.

Kontrolní zkoušky provádíme převážně na upravené zemině. Slouží k ověření, zda se vlastnosti zemin shodují s průkazními zkouškami a odpovídají požadavkům projektové dokumentace. Kontrolní zkoušky provádíme podle ČSN 73 6133 a TP 94. [13]

Při úpravě zemin pojivy provádíme následující zkoušky (hodnoty a četnost jsou uvedeny v TP 94):

- hloubka promísení,
- dávkování pojiva,
- hrudkovitost,
- zkouška pojiva.

Na čerstvě upravené zemině provádíme měření minimální vlhkosti, míru zhutnění (parametr D), kalifornský poměr únosnosti a další měření uvedená v tabulkách 5 a 6.

Vlastnost / Druh sypaniny		Minimální požadavek	Zkouška	Četnost
Modul přetvárnosti $E_{def,2}$ *	CBR > 15 % (PIII)	45 MPa **	ČSN 72 1006	1× na 100 bm dopravního pásu, popř. 1× na 1000 m2 ostatních ploch
	CBR > 30 % (PII)	60 MPa		
	CBR > 50 % (PI)	90 MPa		
* Prokázání minimálních hodnot CBR pro uvedené typy podloží vozovek nemusí zaručit dosažení požadovaného modulu přetvárnosti				
** Pro vozovky s dopravním zatížením třídy VI nebo s návrhovou úrovní porušení D2 platí min. 30 MPa				

Tabulka 5: Kontrolní zkoušky na zemní pláni pro zeminy upravené (viz tab. 11 ČSN 73 6133)

[10]

Vlastnosti / Druh sypaniny		Minimální požadavek	Zkouška	Četnost ¹⁾
Vlhkost	jemnozrnné zeminy	Odchylky od w_{opt} -5 % až +3 %	ČSN CEN ISO/TS 17892-1	1 × 1.250 m ² nebo 500 m ³
Míra zhutnění dle objemové hmotnosti (parametr D)	podloží násypu	92 % PS	ČSN 72 1006	1 × 4.000 m ² nebo 1.500 m ³ a při každé změně sypaniny, u homogenní sypaniny min. 3 × denně
	násyp z jemnozrnných (F) nebo písčitých zemin (SW, SP, SF) nebo popílku	95 % PS		
	aktivní zóna / zemní pláš	100 % PS		1 × na 100 bm dopravního pásu, popř. 1 × 1.000 m ² u ostatních ploch
Minimální vlhkost	zeminy upravené	$w_{0,90}$	ČSN CEN ISO/TS 17892-1	1 × 10.000 m ³ nebo 1 × denně
CBR	ztužující vrstva vrstevnatého násypu	min. 15 %	ČSN EN 13286- 47	
IBI	aktivní zóna	min. deklar. hodnota		
	násyp	min. 10 %		
	podloží násypu	min. 10 %		

¹⁾ Jsou-li uvedena 2 kritéria, musí být splněno přísnější kritérium

¹⁾ Jsou-li uvedena 2 kritéria, musí být splněno přísnější kritérium

Tabulka 6: Kontrolní zkoušky při provádění a po dokončení zemního tělesa z upravených zemin [13]

Výsledky zkoušek musí charakterizovat kontrolovaný úsek a současně postihnout případná slabá místa s nedostatečnou kvalitou zpracování. [13]

3. Metodická část

Pro ověření návrhu úpravy zemin slouží zhutňovací zkouška, jež posloužila i pro potřeby mého experimentu. Zhutňovací zkouška se provádí podle ČSN 72 1006 a její přílohy H, kde je popsán způsob provádění a vyhodnocování zkoušky. Touto zkouškou ověřujeme vhodnost zvolené technologie zhutňování za předpokladů splnění požadovaných hodnot míry zhutnění stanovených normou. Zhutňovací zkouška může sloužit i pro stanovení vhodného parametru míry zhutnění pro sypaniny, které tyto hodnoty nemají určeny. [8]

V průběhu experimentu se během zhutňovací zkoušky prováděly běžně používané přímé metody a zároveň bylo provedeno měření pomocí některých nepřímých metod. Dílčím úkolem bylo porovnání přímých a nepřímých metod a nalezení korelačních vztahů mezi nimi.



Obrázek 4: Zkušební pole při zhutňovací zkoušce [0]

3.1. Zhutňovací zkouška

Jak již bylo napsáno v předchozí kapitole, cílem zhutňovací zkoušky je ověření navržené zhutňovací technologie.

Technologie zhutňování zahrnuje zejména:

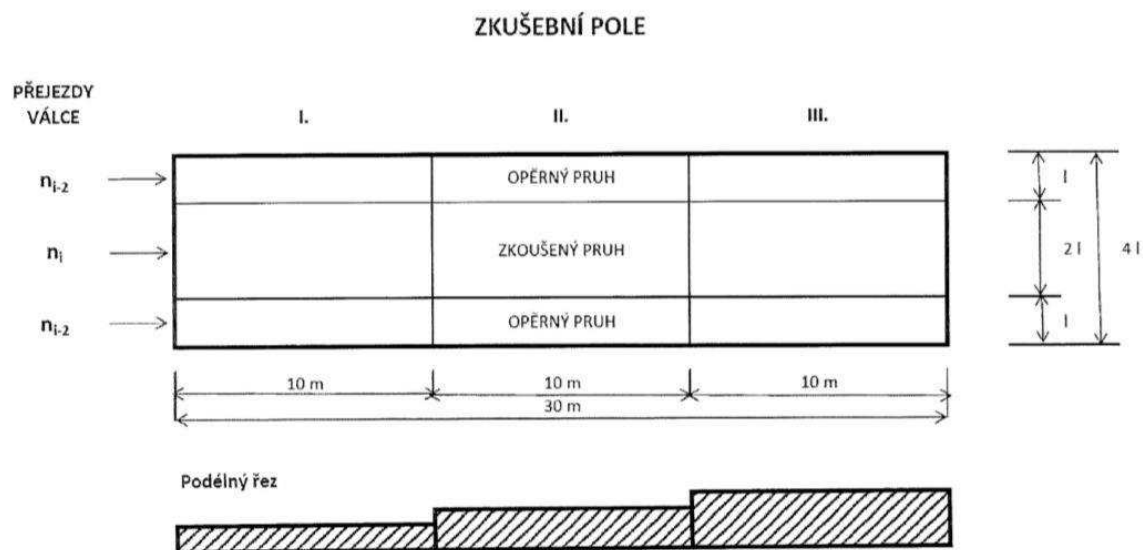
- typ použitého zhutňovacího prostředku,
- tloušťku vrstvy materiálu před zhutněním,
- počet pojezdů a režim hutnění zhutňovacím prostředkem, tak, aby byly splněny hodnoty míry zhutnění požadované normou. [8]

Norma ČSN 72 1006 uvádí, že zhutňovací zkouška zahrnuje mimo jiné zpracování programu zhutňovací zkoušky, dále stavební práce spojené s přípravou zkušebního pole a jeho případnou likvidací, práce spojené s vlastním zhutňováním, terénní geotechnické, laboratorní a měřické práce a dokumentaci zkoušek včetně vyhodnocení a prezentace výsledků ve zprávě. [8]

Zhutňovací zkouška se provádí na základě předem odsouhlaseného programu. V programu by mělo být uvedeno a popsáno následující:

- cíl zkoušky,
- zdroj sypaniny (druh zkoušeného materiálu),
- místo zkoušky,
- počet a popis zkoušených technologií,
- informace o typu zhutňovacího prostředku (výrobce, hmotnost, apod.),
- popis zkušebního pole (tělesa),
- postup prací,
- druh a četnost geotechnických zkoušek,
- způsob vyhodnocení a prezentace výsledků.

Pro potřeby každé technologie zhutňování (tj. druh a vlhkost zeminy, typ zhutňovacího prostředku, režim přejezdů) se navrhuje jedno zkušební pole. Zkušební pole tvoří minimálně tři různé sekce, které mají konstantní mocnost vrstvy. Mocnost vrstvy se navrhuje s ohledem na zrnitost sypaniny a účinnost zhutňovacího prostředku. Příklad uspořádání zkušebního pole je patrný z obrázku 5. [8]



Obrázek 5: Schéma zkušebního pole dle ČSN 72 1006 [8]



Obrázek 6: Vibrační válec při hutnění zkušebního pole [0]

3.1.1 Příprava zhutňovací zkoušky

Zhutňovací zkouška byla prováděna v rámci stavby silnice I/11 Ostrava, Prodloužená Rudná – hranice okresu Opava. Zkouška byla prováděna na zemině upravené hydraulickým silničním pojivem. Konkrétně se jedná o pojivo Doroport TB25, které se vyrábí kombinovaným mletím portlandského slínku a hydraulických komponentů. Zkouška byla prováděna na konstrukčním celku aktivní zóny, která se prováděla v tomto případě v hlubokém zářezu. V tomto zářezu převládají především písčité zeminy, v našem případě byla zemina klasifikována jako S2 SP, což je špatně zrněný písek třídy 2. Tato zemina je z hlediska vhodnosti (ČSN 73 6133, tab. A. 1) pro použití do násypů a pro podloží podmíněčně vhodná. Je nutné zmínit fakt, že v uvedeném zářezu, a nejde v rámci stavby o výjimku, se vlastnosti a struktura zeminy hodně mění prakticky na několika metrech. Ostatně tato skutečnost se během zhutňovací zkoušky často projevila a úprava takových zemin nese svá specifika. [1][10][18]



Obrázek 7: Dávkování pojiva [0]



Obrázek 8: Mísení zeminy s pojivem pomocí zemní frézy [0]

3.2 Popis prováděných laboratorních měření

S ohledem na technické podmínky TP 94, které stanovují zásady pro úpravu zemin a jiných materiálů a které respektují platné české a evropské normy, byla pro zhutňovací zkoušku navržena následující měření:

- statická zatěžovací zkouška, dle ČSN 72 1006, příloha A,
- geodetická kontrolní metoda, dle ČSN 72 1006, příloha G,
- stanovení objemové hmotnosti zemin dle ČSN 72 1010, metoda D-1, stanovení membránovým objemoměrem,
- Proctorova zkouška, dle ČSN EN 13286-2 (prováděno v laboratoři),
- radiometrické určení parametrů míry zhutnění, dle ČSN 73 1375 a ČSN 72 1006, příloha F,
- rázová zatěžovací zkouška lehkou dynamickou deskou, dle ČSN 73 6192, skupina C.

Ověřování rázovou zatěžovací zkouškou a radiometrické měření míry zhutnění, sloužilo k porovnání přímých a nepřímých metod měření.

Z důvodu pokusu o nalezení korelačních vztahů mezi radiometrickou zkouškou, rázovou zatěžovací zkouškou lehkou dynamickou deskou a mírou zhutnění, zjištěnou na základě výsledků přímé jamkové metody membránovým objemoměrem, bylo stanoveno, že tato měření se budou po každých dvou pojezdech provádět v četnosti 5 kusů.

3.2.1 Statická zatěžovací zkouška

Zkouška se provádí podle ČSN 72 1006, příloha A. Slouží pro stanovení míry zhutnění sypanin a k ověření deformačních charakteristik předepsaných dokumentací stavby. Při kontrole statickou zatěžovací zkouškou jsou za kontrolní hodnoty považovány poměr modulů přetvárnosti z druhého a prvního zatěžovacího cyklu a hodnoty modulu přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu. [8]

Pro provedení statické zatěžovací zkoušky slouží následující zkušební zařízení:

- kruhová zatěžovací deska průměru 300 mm (případně 600 mm) s dostatečnou pevností (ČSN 73 6190);
- hydraulický lis, který je schopen vyvodit sílu nejméně o 20 % vyšší než je požadované zatížení desky. Lis musí umožnit udržovat sílu bez kolísání a dovolit její zvyšování i snižování;
- kulový kloub, který se umísťuje v sestavě měřicího zařízení a zajišťuje centrické zatížení zatěžovací desky;
- zařízení pro měření síly vyvozené hydraulickým lisem;
- snímač posuvu, respektive číselníkový úchylkoměr, pro měření zatlačení desky s přesností 0,01 mm;
- měřicí nosník nebo rám s držáky snímačů posuvu. Rozměry nosníku jsou upřesněny v normě;
- protizátěž (naložený nákladní automobil, vibrační válec, apod.). [8]

Na obrázku 9 lze vidět části zařízení pro vykonání statické zatěžovací zkoušky.

Kruhová deska se postupně zatěžuje předepsaným zatížením na pravidelný časový interval ve dvou zatěžovacích cyklech, mezi nimiž je provedeno odlehčení. O průběhu zkoušky se vede předepsaný záznam.

Při vyhodnocení modulu přetvárnosti se vychází z rovnice:

$$E_{def} = \frac{1,5 * \Delta p * r}{\Delta y} \quad (1)$$

kde je:

E_{def} – modul přetvárnosti v MPa

Δp – změna kontaktního napětí v MPa

r – poloměr zatěžovací desky v m

Δy – změna zatlačení zatěžovací desky v m při změně napětí Δp [8]

Výpočet modulu přetvárnosti se provádí z křivek zatížení-zatlačení jednotlivých zatěžovacích větví, které se vyrovnají regresivní křivkou (polynomem 2. stupně). Regresivní křivka je popsána vztahem:

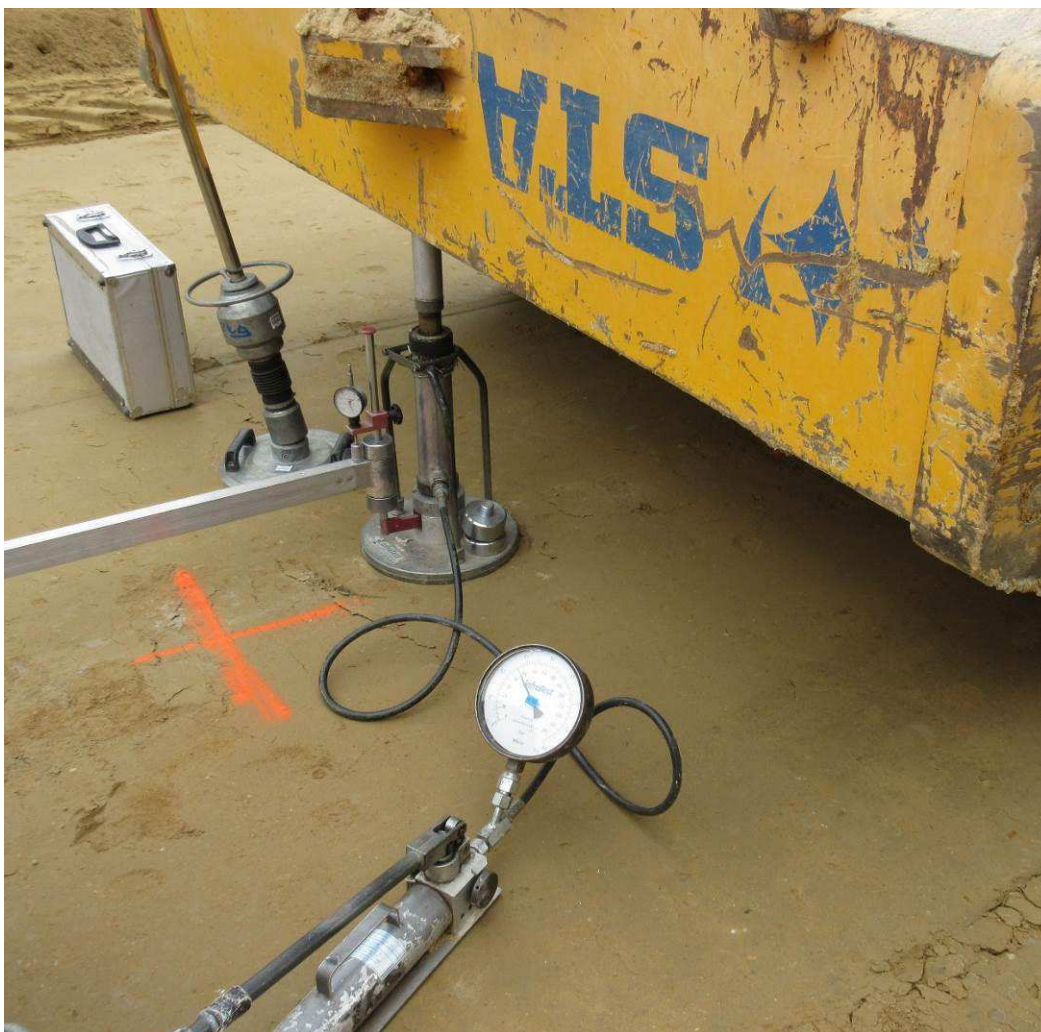
$$y = a_0 + a_1 * p + a_2 * p^2 \quad (2)$$

kde je:

p – kontaktní napětí v MPa

y – zatlačení zatěžovací desky v mm

a_0, a_1, a_2 – konstanty regresivního polynomu v mm, mm·MPa⁻¹, mm·MPa⁻² [14]



Obrázek 9: Statická zatěžovací zkouška [0]

3.2.2 Geodetická kontrolní metoda

Geodetická kontrolní metoda se provádí podle přílohy G, normy ČSN 72 1006. Touto zkouškou se kontroluje zhutňování kamenitých a balvanitých sypanin. Výjimečně se používá rovněž pro písčité a šterkovité zeminy, které obsahují velká zrna, u nichž nelze použít přímých zkušebních metod pro stanovení objemové hmotnosti. Tato metoda se dnes používá výhradně při zhutňovacích zkouškách, pro určení stavu, kdy už nedochází k poklesu vrstvy zhutňovaného materiálu při hutnění. [8]

Měření probíhá na pláni nebo povrchu vrstvy, na nichž se vyznačí 12 měřících bodů. Body se označí buďto barvou, nebo pomocí kovových značek (destiček). Prvním statickým

přejezdem válce bez vibrace se provede stabilizace značek na kontrolované vrstvě. Měřicí body (destičky) se následně geodeticky zaměří (znivelují). Poté se geodetické zaměření opakuje po každém hutnicím pojezdu. [8]

Posuzuje se střední hodnota dodatečného stlačení zhutňované vrstvy Δh , popřípadě přírůstek poměrného stlačení vrstvy $\Delta \varepsilon = \Delta h / h$ vůči požadované hodnotě z požadavků dokumentace. Geodetická kontrolní metoda se ukončuje ve chvíli, kdy průměrná hodnota stlačení $\Delta \varepsilon$ zhutněné vrstvy po dvou pojezdech nepřekročí hodnotu 0,5 % zhutňované vrstvy. [8]

3.2.3 Stanovení objemové hmotnosti membránovým objemoměrem

Jamková zkouška slouží ke kontrole zhutnění. Při této zkoušce se porovnává objemová hmotnost zjištěná přímo v terénu s objemovou hmotností zjištěnou v laboratoři při optimální vlhkosti W_{opt} .

Zkouška se provádí plastovým válcem (obrázek 10), který je opatřen pístem a na dně membránou, v níž je vodní roztok. Přístroj se osadí na připevněnou základní desku (kroužek) a působením na píst dojde k vytlačení vzduchu z pístu a přitlačení membrány k povrchu. Následně se opíše čtení h_0 ze stupnice, která je umístěna na pístu objemoměru. Poté se přístroj odloží, v kroužku se vyhloubí jamka, odebraný vzorek se pečlivě uloží a měření s přístrojem se opakuje. Membrána s vodou vyplní objem celé jamky a opět se opíše čtení h_1 ze stupnice (obrázek 10). [8] [9]

Výpočet objemové hmotnosti se stanoví ze vztahu:

$$V = (h_1 - h_0) * F \quad (3)$$

kde je:

V – objem odebraného vzorku

F – plocha membrány (pístu) objemoměru



Obrázek 10: Čtení hodnot ze stupnice membránového objemoměru [0]

3.2.4 Proctorova zkouška

Zkouška zhutnitelnosti Proctor Standard je prováděna dle normy ČSN EN 13286-2. Principem této zkoušky je stanovení maximální objemové hmotnosti v závislosti na optimální vlhkosti, při které je zemina nejlépe zhutnitelná. Zemina nejprve vysušená a následně vhodně zvlhčená se ukládá do moždíře a je hutněna pěchem o hmotnosti 2500 g, který dopadá na zeminu z výšky 300 mm. Po zhutnění je vzorek zvážen a následně odebrán malý vzorek na zjištění vlhkosti. [1][4]

Míra zhutnění se stanovuje dle vztahu 4, porovnáním z hodnot membránového objemoměru. Míra zhutnění je v tomto případě stanovena přímou metodou.

Hodnota míra zhutnění se stanovuje podle vztahu:

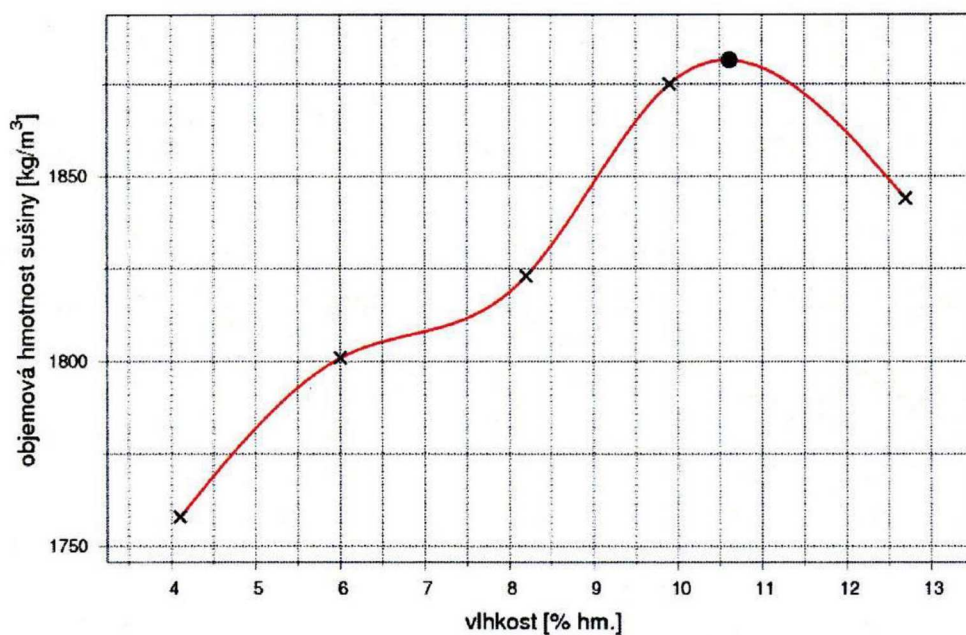
$$D = \frac{\rho_d}{\rho_{d,maxPS}} * 100 \quad (4)$$

kde je:

ρ_d – objemová hmotnost suché zeminy podle ČSN 72 1010 v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$\rho_{d, max PS}$ – maximální objemová hmotnost suché zeminy stanovená Proctorovou standardní zkouškou podle ČSN 72 1015 v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [8]

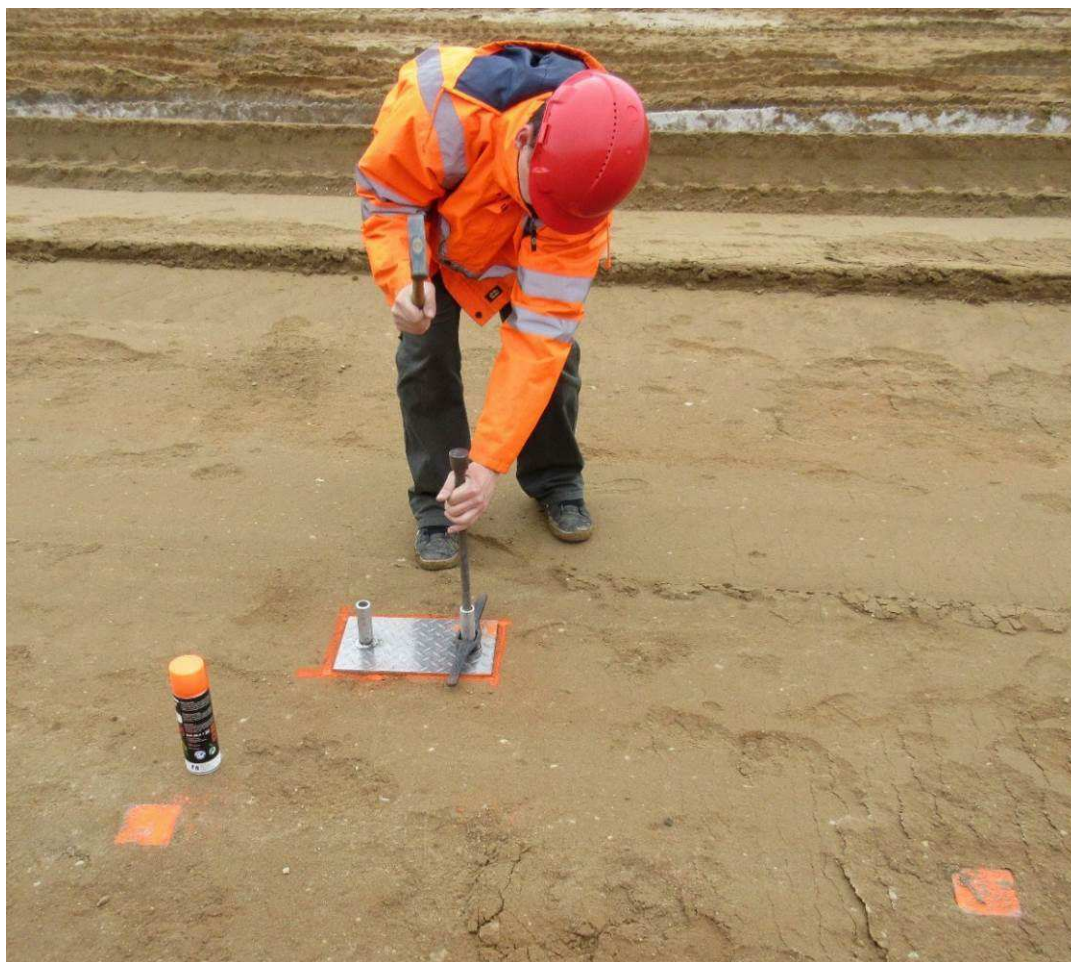
Obrázek 11 představuje graf závislosti objemové hmotnosti a vlhkosti na zkušebním vzorku.



Obrázek 11: Křivka zhutnitelnosti [0]

3.2.5 Radiometrické určení parametrů míry zhutnění

Tato metoda se provádí podle ČSN 72 1006, příloha F a ČSN 73 1375. Radiometrická sonda je rychlá a přesná metoda. Je založena na vyzařování izotopu Cesia 137 do zemin (z povrchu či ze sondy). Izotop je zdrojem gama záření, které se odráží zpět do čidla v přístroji. Hutná zemina absorbuje více izotopu než kyprá, a tak je měření přesné. Přístroj také vyhodnocuje vlhkost zeminy. Využití metody je vhodné pro homogenní jemnozrnné a středně zrné zeminy a sypaniny, jejichž míra zhutnění se určuje na základě poměru objemové hmotnosti zjištěné po zhutnění a laboratorně zjištěné maximální objemové hmotnosti. Podmínkou pro určení parametrů míry zhutnění je prozáření do hloubky minimálně 20 cm. Jde o metody, kdy se do předem vyraženého otvoru (obrázek 12) zasouvá tyč se zářičem (obrázek 13). Minimální doba expozice je 1 minuta. [8]



Obrázek 12: Příprava otvoru pro zářič radiosondy [0]

Spolehlivost použití radiometrického přístroje na zkoušené zemině je třeba prokázat součinitelem korelace mezi hodnotami objemových hmotností určených tímto přístrojem a hodnotami určenými podle ČSN 72 1010 (např. membránovým objemoměrem). Součinitel korelace se stanoví ze souboru minimálně 12 párových hodnot, přičemž součinitel korelace $R_{xy,min}$ nesmí být nižší než 0,70. [8]

Míra zhutnění se stanovuje dle vztahu 4 (viz kapitola 3.2.4), popřípadě po vložení hodnoty $\rho_{d, max PS}$ do přístroje poskytne jednotka přímo hodnotu parametru míry zhutnění D .



Obrázek 13: Zasunutí zářiče radiosondy (hl. 25 cm) [0]

3.2.6 Rázová zatěžovací zkouška lehkou dynamickou deskou

Jedná se o rychlou zkušební metodu pro kontrolu dynamických parametrů zhutňovaných sypanin. Oproti statické zatěžovací zkoušce odpadá nutnost protizátěže, což je výhodou zejména při malém rozsahu prací, v rýhách a těžko přístupných místech. Tato zkušební metoda je vhodná zejména pro hrubozrnné a smíšené zeminy s největším zrnem do 63 mm. Měření se provádí dle ČSN 73 6192. Dynamická zatěžovací zkouška lehkou dynamickou deskou je zkušební metoda, při které se v zemině vyvodí zatížení rázem závaží. Povrch zkoušeného prostředí je zatížen rázovým pulzem, který je vyvozený pádem závaží na kruhovou desku. Následkem pádu beranu na kruhovou zatěžovací desku prostřednictvím tlumicího systému dojde k průhybu povrchu měřeného prostředí. Vyhodnocením průhybu se získají fyzikálně mechanické vlastnosti prostředí. [11]

Zařízení pro měření obsahuje tyto součásti:

- Kruhová zatěžovací deska, kterou tvoří:
 - deska o průměr 300 mm s tuhostí dle ČSN 73 6190, hmotnost 15 kg,
 - pouzdro se snímačem průhybu,
 - středící kloub.
- Vodící tyč se závažím složená z těchto částí:
 - rázové závaží s kruhovou rukojetí (hmotnost 10 kg),
 - vodící tyč závaží,
 - aretační kolík,
 - držadlo,
 - spouštěcí západka.
- Měřicí zařízení tvořené z:
 - mikropočítačové vyhodnocovací jednotky,
 - tiskárny.

Předepsány jsou tři údery závažím na zatěžovací desku. Poklesy desky se po každém rázu automaticky zaznamenávají, zprůměrují a jsou dopočteny výsledné hodnoty rázového modulu deformace M_{vd} . Mezivýsledky jsou průběžně tištěny s grafickým vykreslením průběhu. [11]

Rázový modul deformace M_{vd} počítá mikropočítačová vyhodnocovací jednotka podle následujícího vztahu automaticky:

$$M_{vd} = \frac{1,57}{y_c} * (1 - v^2) * a * \sigma \quad (5)$$

Kde je:

M_{vd} – rázový modul deformace [MPa]

v – poissonovo číslo [-]

a – poloměr zatěžovací desky [mm]

σ – kontaktní napětí pod zatěžovací deskou [MPa]

y_c – velikost celkového průhybu pod středem desky [mm] [11]



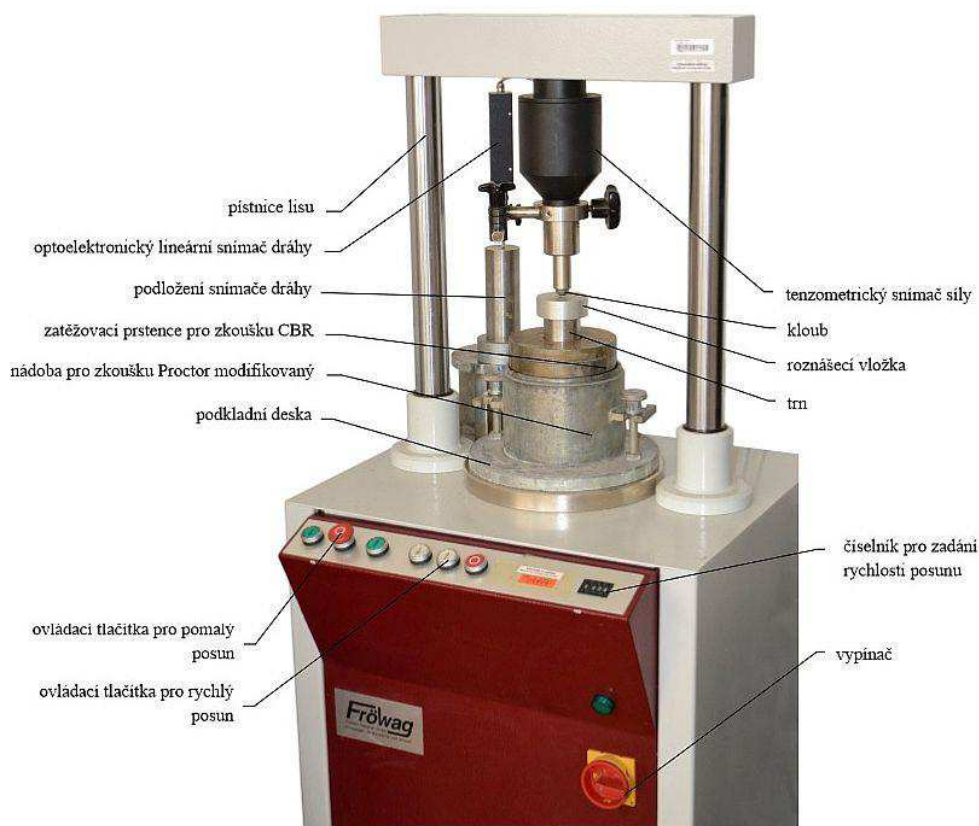
Obrázek 14: Rázová zkouška lehkou dynamickou deskou [0]

3.2.7 Kalifornský poměr únosnosti – zkouška CBR

Zkouška se provádí podle normy ČSN EN 13286-47. Kalifornský poměr únosnosti CBR (California Bearing Ratio) byl vyvinut před 2. světovou válkou v Kalifornii. Zkouška byla určena pro měření únosnosti podkladních půd při výstavbě silnic. [11][15]

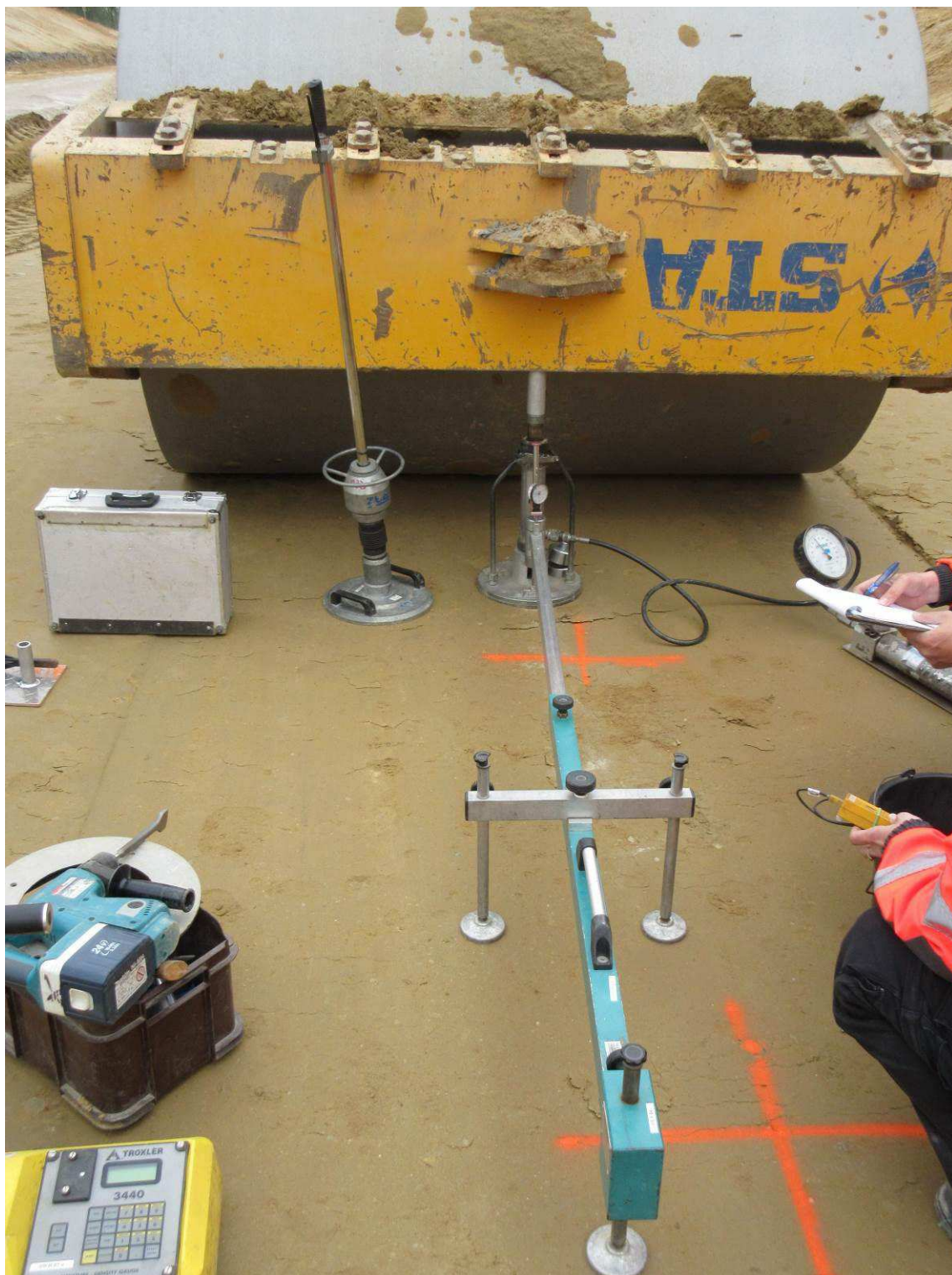
Kalifornský poměr únosnosti je číslo (%) vyjadřující poměr síly potřebné k zatlačení standartního trnu konstantní rychlostí do stanovené hloubky vzorku zeminy vůči síle potřebné k zatlačení téhož trnu do stejné hloubky v normovém kamenivu. Normové kamenivo pro tuto zkoušku je drcený vápenec nacházející se v Kalifornii (CBR = 100%). CBR se provádí vždy se zatěžovacím prstencem. [1][11][15]

Variantou zkoušky CBR je IBI (Immediate bearing index), což je okamžitá hodnota poměru únosnosti bez použití zatěžovacího prstence. IBI se zjišťuje krátce po úpravě zeminy (např. hutněním), v případě zemin upravených hydraulickými pojivy do 90 minut po smíchání směsi. [11][15]



Obrázek 15: Fröwag lis na CBR (ČSN EN 13286-47) [15]

4. Experimentální část



Obrázek 16: Statická zatěžovací zkouška [0]

4.1 Silnice I/11 Prodloužená Rudná – poznatky z geotechnického průzkumu

Geotechnický průzkum, který byl realizován během roku 2005, byl podkladem pro zpracování projektové dokumentace stavby „Silnice I/11 Ostrava - Prodloužená Rudná“. Průzkum potvrdil variabilitu zemin, které se nacházejí ve sledovaném území. [14]

Úsek, ve kterém byl prováděn návrh, se nachází v zářezu staničení cca km 12.800. Hloubka zářezu se pohybuje v rozmezí 0 až 7 metrů. Do hloubky 3 metrů převažují jemnozrnné zeminy eolické a deluvioeolické (sprašové hlíny) a dále glaciální jemnozrnné zeminy. Hluběji převládají glaciální písčité zeminy třídy S2 až S5, rovněž se zde objevují zeminy štěrkovité glaciální a glacifluviální. [14]

4.2 Zhutňovací zkouška č. 1

Zhutňovací zkouška byla naplánována na den 17. dubna roku 2015. Zkouška byla prováděna na konstrukčním celku aktivní zóny, která se prováděla v tomto případě v hlubokém zářezu. Zemina převládající v tomto zářezu byla klasifikována označením S2 SP, což je špatně zrněný písek. Tato zemina je z hlediska vhodnosti (ČSN 73 6133, tab. A. 1) pro použití do násypů a pro podloží podmíněčně vhodná. Vhodným pojivem pro tento druh zeminy je hydraulické silniční pojivo. V našem případě bylo použito hydraulické silniční pojivo Doroport TB25. Zkušební z jiných úseků stavby předpokládaly použití 3 % tohoto pojiva. Zmíněné množství bylo z ekonomického hlediska akceptováno i zhotovitelem.

4.2.1 Program a realizace zhutňovací zkoušky

Pro potřeby zhutňovací zkoušky byl vypracován a odsouhlasen program (viz příloha I).

Postup prací byl následující:

1. Vrstva neupravené zeminy byla srovnána a zhutněna. Na takto upraveném poli bylo nadávkováno pojivo Doroport (ČSN EN 13 282-2, výrobce Cemex ČR). Zhotovitelem bylo navrženo dávkování 3%. Zemina na zkušebním poli byla

zpracována jedním přejezdem zemní frézy s hloubkou záběru 0,5 m. Následně byly odebrány vzorky k ověření geotechnických vlastností (vlhkost, objemová hmotnost, apod.). Poté bylo zkušební pole srovnáno a provedl se srovnávací přejezd vibračním válcem.

2. Provedlo se osazení měřících bodů (ocelových destiček) a jeden statický přejezd vibračního válce bez vibrace (nulový pojezd).
3. Bylo provedeno geodetické zaměření bodů.
4. Provedl se 1. přejezd vibračního válce.
5. Bylo provedeno geodetické zaměření bodů.
6. Provedly se další přejezdy vibračního válce s vibrací. Geodetické zaměření se provedlo po každém vibračním přejezdu.
7. Po 2., 4., 6., popř. 8. přejezdu byly odebrány vzorky (objemová hmotnost PS) a provedeno se měření (SZZ, 5× radiosonda, 5× jamka, 5× LDD).
8. Zkoušky byly ukončeny dle výsledků geodetického zaměření - po dvou pojezdech nesmí být překročena hodnota o 0,5 % z mocnosti zhutněné vrstvy tj. 2,5 mm.
9. Na závěr byly opět odebrány vzorky a provedeno měření (viz bod č. 7).
10. O provedení zhutňovací zkoušky, odběrech vzorků, měření a jejich základním vyhodnocení byla zpracována dokumentace.

K dispozici byla tato technika:

- vibrační válec STA VV2010D, hmotnost 21.000 kg, šířka běhounu 2,2 m,
- zemní fréza Wirtgen WR2000,
- grejdr HBM BG 160 TA3,
- dávkovač pojiva Mercedes Actros 3350,
- kropicí vůz Tatra 815.

V ranních hodinách bylo vytýčeno zkušební pole o celkové délce cca 60 metrů a šířce 8 metrů a byly odebrány vzorky neupravené zeminy. Na tomto poli bylo nadávkováno 3 % pojiva s přídatkem cca 20 litrů vody na čtvereční metr. Bylo provedeno kontrolní měření množství pojiva. Následně zemní fréza toto pojivo zpracovala společně se zeminou. Během úpravy zeminy byla ověřena její hrudkovitost a hloubka promísení. Na poli srovnaném grejdrzem byly poté rozmístěny zkušební měřící destičky (kovové destičky 10×10 cm) a byl proveden jeden statický přejezd (bez vibrace) vibračním válcem.

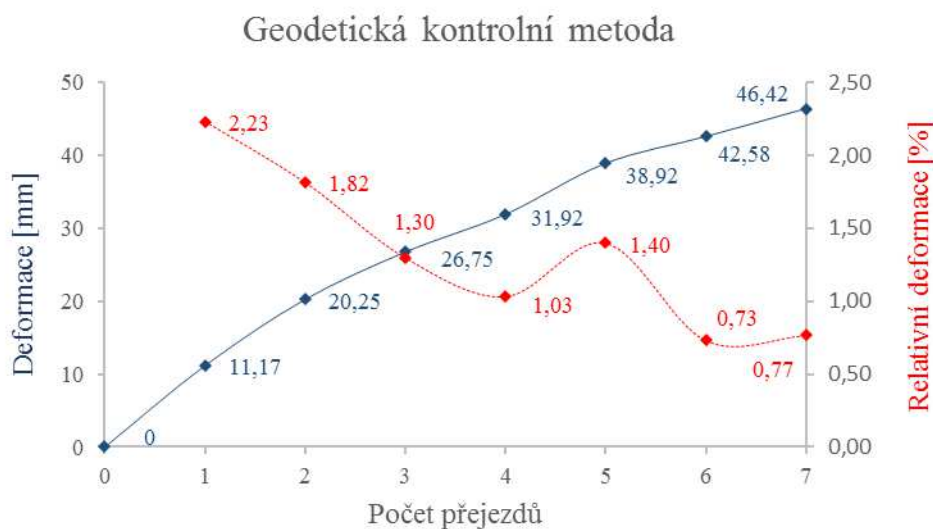


Obrázek 17: Zemní fréza ve spojení s kropičkou při mísení zeminy [0]

4.2.2 Výsledky provedených měření – geodetická kontrolní metoda

Na připraveném zkušebním poli následovala laboratorní měření, v režimu odpovídajícímu programu zhutňovací zkoušky. Hodnoty zjištěné při měření se porovnály s hodnotami určenými v příslušných normách, nebo zadanými v dokumentaci stavby.

Během zhutňovací zkoušky bylo provedeno celkem šest přejezdů s vibrací a dva, na závěr, bez vibrace. K poklesům měřicích bodů na zkušebním poli docházelo rovnoměrně. Po šestém přejezdu již povrch upravené aktivní zóny místy vykazoval deformace, proto v závěru zhutňovací zkoušky již byly zvoleny přejezdy bez vibrace. K mírným poklesům však docházelo neustále a ani po 7. přejezdu nebyl průměrný naměřený pokles nižší než 0,5 % z mocnosti zhutňované vrstvy, což je dobře patrné z grafu technické nivelace – obrázek č. 15. K poklesům by patrně docházelo i po dalším hutnění, což ovšem vzhledem k narušenému povrchu zhutňované vrstvy pozbývalo smysl. Proto byla zhutňovací zkouška po 7. vibračním přejezdu končena.



Obrázek 18: Graf geodetické kontrolní metody [0]

Měřený bod	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	průměr
0. přejezd	61,3	61,7	59,8	61,0	58,9	58,2	56,2	55,8	54,5	54,0	52,0	51,5	57,08
1. přejezd	62,3	62,3	61,0	61,3	60,6	58,6	57,5	57,1	55,5	54,6	54,0	53,5	58,2
Δh_1	-10	-6	-12	-3	-17	-4	-13	-13	-10	-6	-20	-20	-11,17
% def.	-2	-1,2	-2,4	-0,6	-3,4	-0,8	-2,6	-2,6	-2	-1,2	-4	-4	-2,23
2. přejezd	63,2	63,3	61,9	62,5	62,0	59,2	58,0	58,0	56,8	55,5	55,0	53,8	59,1
Δh_2	-9	-10	-9	-12	-14	-6	-5	-9	-13	-9	-10	-3	-9,08
% def.	-1,8	-2	-1,8	-2,4	-2,8	-1,2	-1	-1,8	-2,6	-1,8	-2	-0,6	-1,82
3. přejezd	63,8	64,4	62,6	62,6	62,7	59,8	58,3	58,5	57,2	55,9	57,2	54,0	59,75
Δh_3	-6	-11	-7	-1	-7	-6	-3	-5	-4	-4	-22	-2	-6,5
% def.	-1,2	-2,2	-1,4	-0,2	-1,4	-1,2	-0,6	-1	-0,8	-0,8	-4,4	-0,4	-1,3
4. přejezd	64,4	64,9	63,3	63,0	63,5	60,5	58,8	58,7	57,9	56,5	57,5	54,2	60,27
Δh_4	-6	-5	-7	-4	-8	-7	-5	-2	-7	-6	-3	-2	-5,17
% def.	-1,2	-1	-1,4	-0,8	-1,6	-1,4	-1	-0,4	-1,4	-1,2	-0,6	-0,4	-1,03
5. přejezd	65,0	65,8	63,6	63,5	63,9	61,0	59,5	59,0	58,5	58,9	58,2	54,7	60,97
Δh_5	-6	-9	-3	-5	-4	-5	-7	-3	-6	-24	-7	-5	-7
% def.	-1,2	-1,8	-0,6	-1	-0,8	-1	-1,4	-0,6	-1,2	-4,8	-1,4	-1	-1,4
6. přejezd	65,5	66,0	64,0	63,7	64,3	61,3	59,8	59,1	58,5	59,4	59,4	55,0	61,33
Δh_6	-5	-2	-4	-2	-4	-3	-3	-1	-0	-5	-12	-3	-3,67
% def.	-1	-0,4	-0,8	-0,4	-0,8	-0,6	-0,6	-0,2	-0	-1	-2,4	-0,6	-0,73
7. přejezd	66,0	66,1	64,4	64,2	64,6	62,1	60,0	59,5	59,2	59,5	59,5	55,5	61,72
Δh_7	-5	-1	-4	-5	-3	-8	-2	-4	-7	-1	-1	-5	-3,83
% def.	-1	-0,2	-0,8	-1	-0,6	-1,6	-0,4	-0,8	-1,4	-0,2	-0,2	-1	-0,77
Δh_{1-7}	-47	-44	-46	-32	-57	-39	-38	-37	-47	-55	-75	-40	-46,42
% def. 0-7	-9,4	-8,8	-9,2	-6,4	-11	-7,8	-7,6	-7,4	-9,4	-11	-15	-8	-9,25

Tabulka 7: Hodnoty naměřené při geodetické kontrolní metodě [0]

4.2.3 Výsledky provedených měření – výsledky Proctorovy zkoušky

Proctor standard se prováděl ze vzorků odebraných po každém druhém vibračním přejezdu a po závěrečném přejezdu bez vibrace. Vzorek zeminy byl odebrán i před úpravou zeminy, zjištěné hodnoty optimální vlhkosti, při maximální objemové hmotnosti, byly zásadně nižší než po úpravě.

Optimální vlhkost zeminy W_{opt} se pohybovala v rozmezí 10,4 – 11,1 %, při objemové hmotnosti 1868 – 1900 kg/m³. Měření prokázalo vzrůstající vývoj hodnot objemové hmotnosti (tabulka 8). Výsledky zjištěné v laboratoři se porovnávaly s objemovou hmotností zjištěnou na místě pomocí membránového objemoměru (viz kapitola 3.2.3). Výsledky míry zhutnění jsou uvedeny v další kapitole.

Počet přejezdů vibračního válce	Optimální vlhkost W_{opt} [%]	Objemová hmotnost PS [kg/m ³]
0 přejezdů – prostá zemina	7,0	1790
2 přejezdy	10,7	1868
4 přejezdy	10,6	1881
6 přejezdů	11,1	1896
6 přejezdů + 2 bez vibrace	10,4	1900

Tabulka 8: Naměřené hodnoty objemové hmotnosti [0]

4.2.4 Výsledky provedených měření – stanovení objemové hmotnosti membránovým objemoměrem

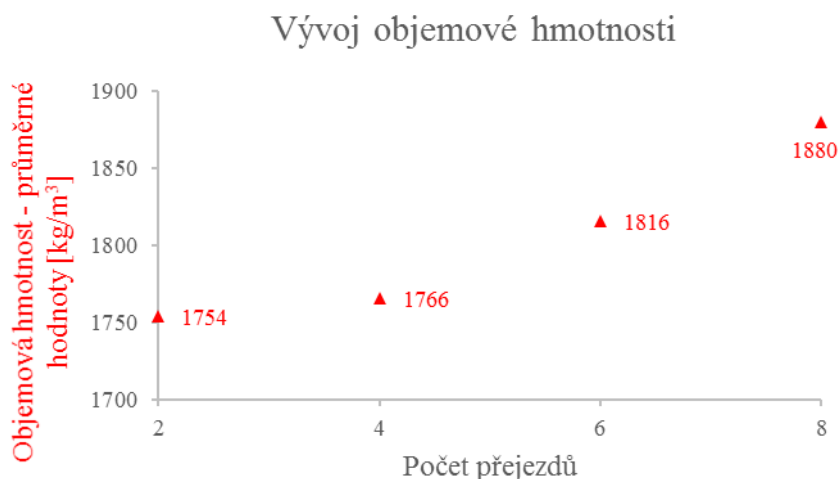
Stanovení objemové hmotností pomocí membránového objemoměru je přímou zkušební metodou používanou pro zjištění parametru míry zhutnění (D). Jamky se prováděly po každém sudém přejezdu vibračního válce, vždy pět jamek v těsné blízkosti. Hodnoty míry zhutnění byly stanoveny z takto naměřených hodnot objemových hmotností přímo v terénu na stavbě a objemovými hodnotami zjištěnými zkouškou Proctor standard, což je maximální objemová hmotnost zjištěná při optimální vlhkosti, pomocí vztahu 4.

Minimální hodnota míry zhutnění D pro aktivní zóny stanovena normou ČSN 73 6133 činí 100%. Tento požadavek byl v den zhutňovací zkoušky splněn pouze jednou. Po třech dnech zrání již naměřené hodnoty splňovaly normativní požadavek. V tabulce 9 jsou uvedeny všechny naměřené hodnoty objemové hmotnosti, obrázek 19 graficky znázorňuje vývoj průměrných hodnot objemové hmotnosti. Totéž je uvedeno i pro parametr míry zhutnění D (tabulka 10, obrázek 20).

Stanovení míry zhutnění D je přímou kontrolní metodou při kontrole zhutnění. Hodnoty naměřené při zhutňovací zkoušce dávaly již v této fázi tušit, že návrh pravděpodobně nebude úspěšný.

Počet přejezdů	Objemová hmotnost [kg/m ³]					
	jamka 1	jamka 2	jamka 3	jamka 4	jamka 5	průměr
2 přejezdy	1573	1769	1858	1780	1790	1754
4 přejezdy	1717	1778	1778	1752	1805	1766
6 přejezdů	1790	1783	1868	1855	1785	1816
6 přejezdů. + 2 bez vibrace	1872	1828	1838	1865	1997	1880
Po třech dnech zrání	1837	x	x	x	x	1837

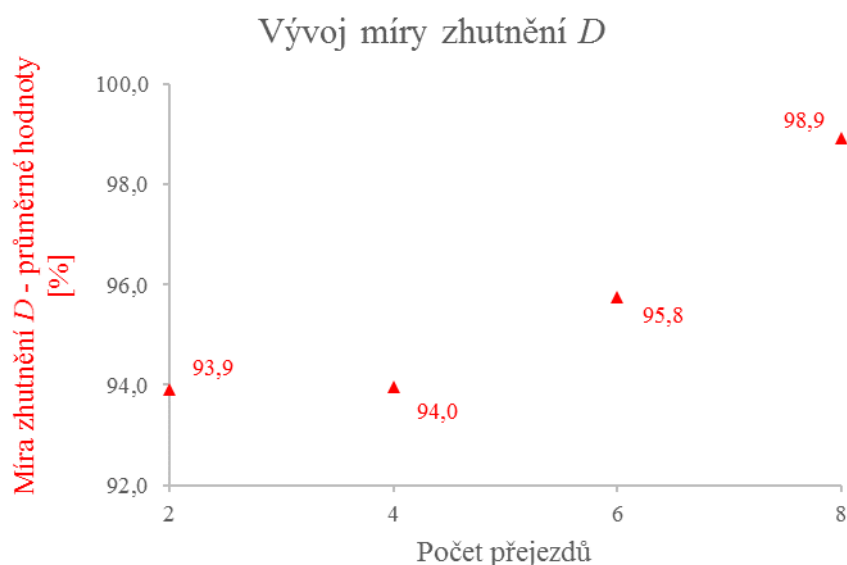
Tabulka 9: Naměřené hodnoty objemové hmotnosti [0]



Obrázek 19: Grafické znázornění vývoje objemové hmotnosti stanovené přímou metodou [0]

Počet přejezdů	Míra zhutnění D [%]					
	jamka 1	jamka 2	jamka 3	jamka 4	jamka 5	průměr
2 přejezdy	84,2	94,7	99,5	95,3	95,8	93,9
4 přejezdy	91,3	94,5	94,9	93,1	96,0	94,0
6 přejezdů	94,4	94,0	98,5	97,8	94,1	95,8
6 přejezdů. + 2 bez vibrace	98,5	96,2	96,7	98,2	105,1	98,9
Po třech dnech zrání	100,3	x	x	x	x	100,3

Tabulka 10: Naměřené hodnoty míry zhutnění D [0]



Obrázek 20: Grafické znázornění vývoje parametru zhutnění D [0]

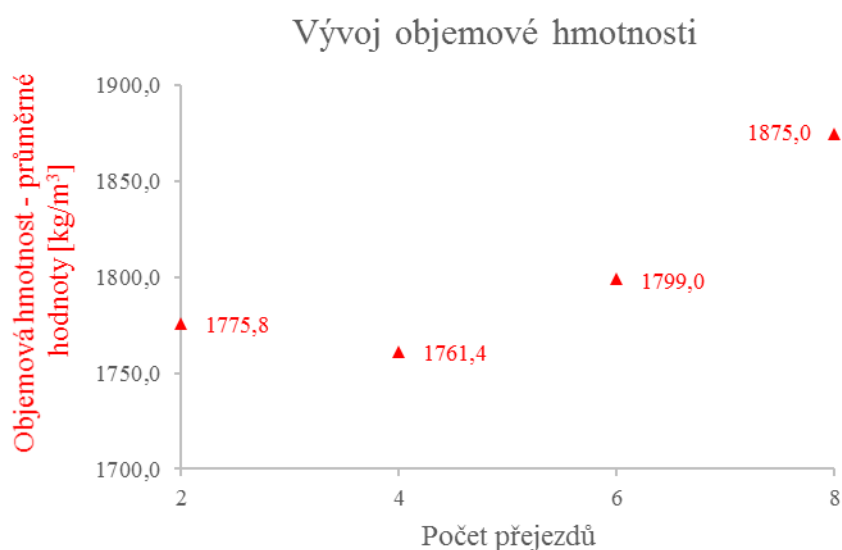
4.2.5 Výsledky provedených měření – radiometrické určení parametrů zhutnění

Měření radiosondou se provádělo v bezprostřední blízkosti každé jamky v hloubce 25 cm. Hodnoty objemových hmotností byly o něco málo nižší než v případě membránového objemoměru (více v tabulce 11). Nižší byly proto i hodnoty míry zhutnění D , poté, co byly porovnány s výsledky stanovenými Proctorovou zkouškou.

Hodnoty objemové hmotnosti naměřené radiosondou neprokazují významnou závislost na režimu hutnění, přestože průměrné hodnoty ukazují určitý vzestup.

Počet přejezdů	Objemová hmotnost [kg/m ³]					
	měření 1	měření 2	měření 3	měření 4	měření 5	průměr
2 přejezdy	1773	1785	1788	1787	1746	1775
4 přejezdy	1815	1733	1755	1748	1756	1761
6 přejezdů	1875	1760	1768	1833	1759	1799
6 přejezdů + 2 bez vibrace	1910	1875	1850	1874	1866	1875

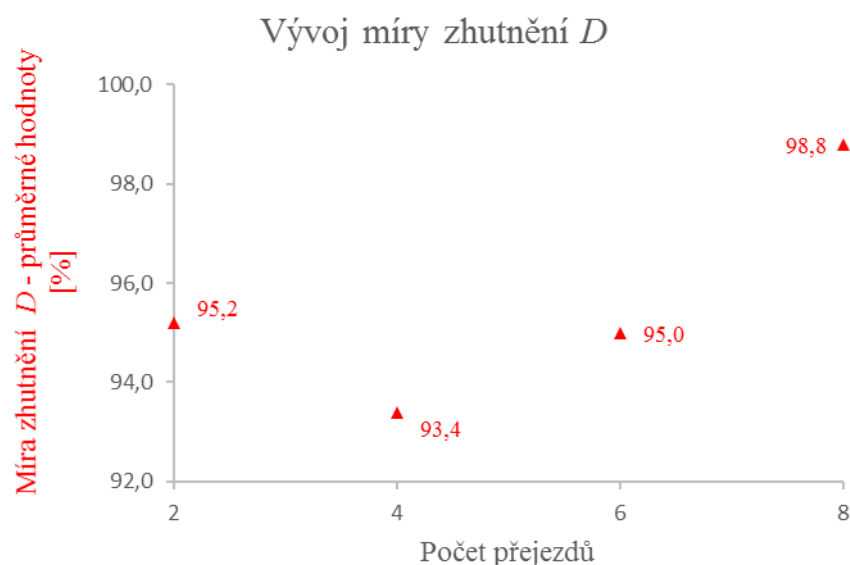
Tabulka 11: Naměřené hodnoty objemové hmotnosti [0]



Obrázek 21: Grafické znázornění vývoje objemové hmotnosti na základě měření radiometrickou metodou [0]

Počet přejezdů	Míra zhutnění D [%]					
	měření 1	měření 2	měření 3	měření 4	měření 5	průměr
2 přejezdy	95	96	96	96	93	95,2
4 přejezdy	96	92	93	93	93	93,4
6 přejezdů	99	93	93	97	93	95
6 přejezdů + 2 bez vibrace	101	99	97	99	98	98,8

Tabulka 12: Naměřené hodnoty míry zhutnění D [0]



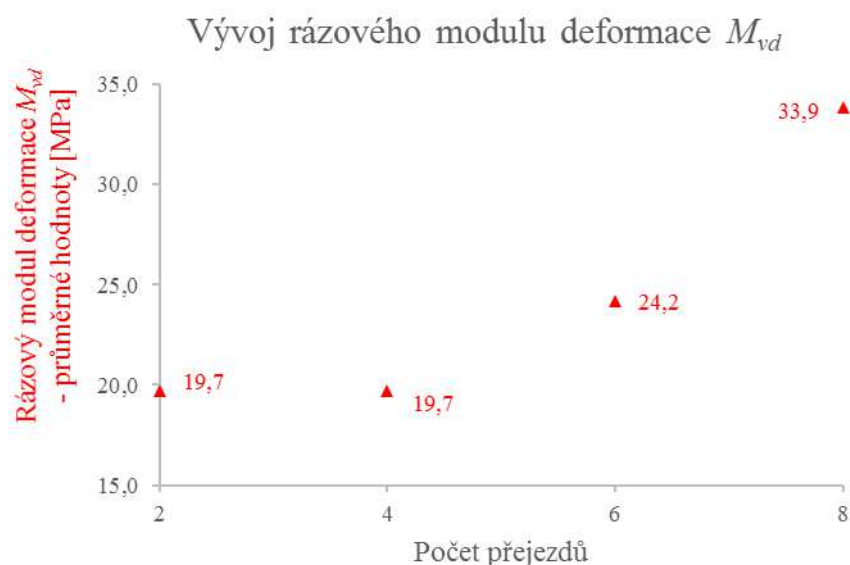
Obrázek 22: Grafické znázornění vývoje parametru zhutnění D [0]

4.2.6 Výsledky provedených měření – rázová zatěžovací zkouška lehkou dynamickou deskou

Podobně jako radiometrické měření i rázové zkoušky byly prováděny v návaznosti na jamky ve stejném místě. Opět se provádělo pět rázových zkoušek. Naměřený rázový modul deformace M_{vd} na rozdíl od předešlých metod neuvažuje s objemovou hmotností. Vzhledem k jednoduchosti a rychlosti této metody bylo konečné porovnání s přímou metodou velmi zajímavé. Hodnoty rázového modulu deformace měly stoupající tendenci až po šestém vibračním přejezdu. Tuto skutečnost dokumentuje následující tabulka a graf.

Počet přejezdů	Rázový modul deformace M_{vd} [MPa]					
	měření 1	měření 2	měření 3	měření 4	měření 5	průměr
2 přejezdy	19,4	20,0	20,8	17,8	20,5	19,7
4 přejezdy	20,3	16,7	18,1	21,4	22,0	19,7
6 přejezdů	22,3	22,0	31,7	24,3	20,7	24,2
6 přejezdů + 2 bez vibrace	39,9	30,3	30,1	36,4	32,6	33,9

Tabulka 13: Hodnoty rázového modulu naměřené při rázové zatěžovací zkoušce [0]



Obrázek 23: Grafické znázornění vývoje hodnot rázového modulu naměřených při rázové zatěžovací zkoušce [0]

4.2.7 Výsledky provedených měření – statická zatěžovací zkouška

Ač je statická zatěžovací zkouška velmi pracnou a časově náročnou metodou pro zjištění parametrů zhutnění, je to zřejmě nejpoužívanější nepřímá metodou ověřování únosnosti zemin. V mém experimentu byla zkouška prováděna pouze 3×, a to po druhém, čtvrtém a šestém přejezdu vibračního válce. Také v případě této metody rostl modul přetvárnosti v závislosti na počtu vibračních přejezdů a současně klesala hodnota poměru modulů přetvárnosti mezi druhým a prvním zatěžovacím cyklem.

Počet přejezdů vibračního válce	E_{def2} [MPa]	E_{def2}/E_{def1}
2 přejezdů	50,2	8,37
4 přejezdů	53,7	7,16
6 přejezdů	58,1	6,05

Tabulka 14: Výsledky statické zatěžovací zkoušky [0]

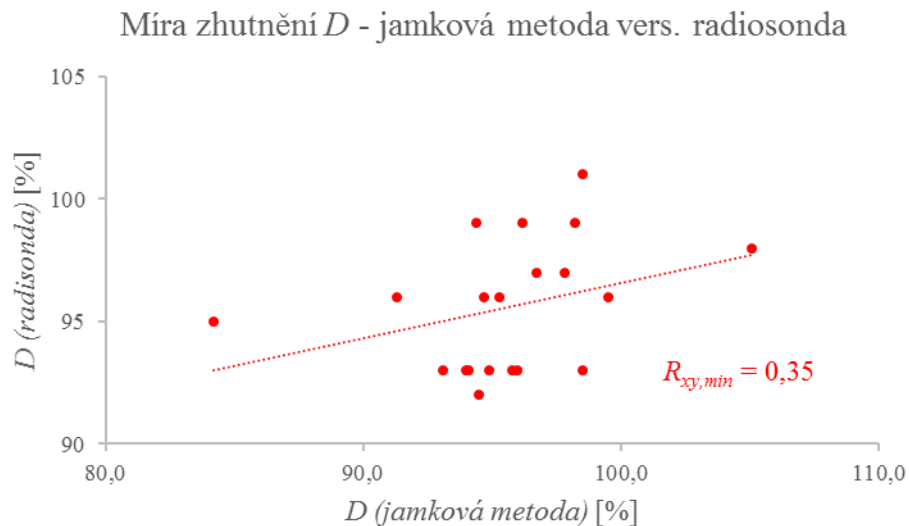


Obrázek 24: Grafické znázornění vývoje hodnot naměřených při statické zatěžovací zkoušce [0]

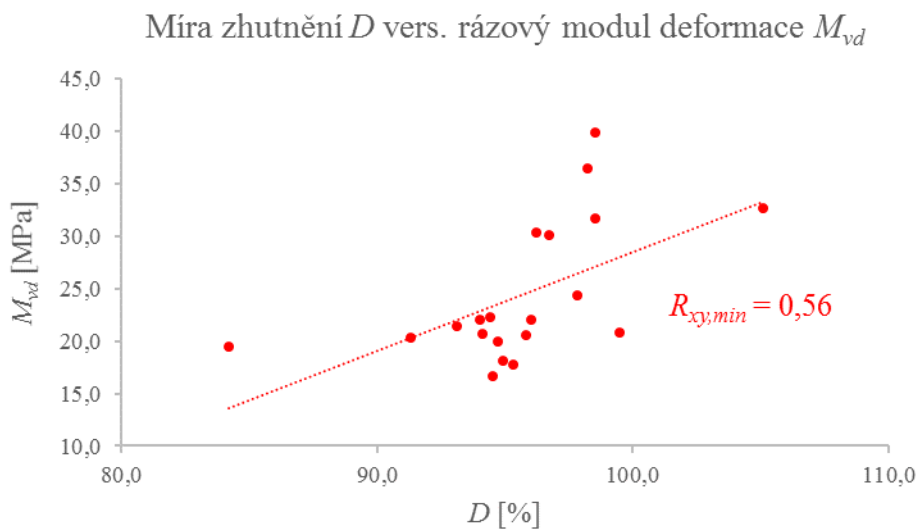
4.2.8 Výsledky provedených měření – porovnání přímých a nepřímých metod parametrů zhutnění

Při porovnávání přímých a nepřímých metod zkoušení byly porovnávány výsledné hodnoty míry zhutnění zjištěné při měření jamkovou metodou s radiometrickým měřením a rázovou zatěžovací zkouškou lehkou dynamickou deskou.

Dílčí výsledky byly zaznamenávány tak, aby nedošlo k promíchání trojice hodnot naměřených pokaždé jinou metodou. Pro dodržení dostatečné těsnosti korelačního vztahu se požaduje korelační koeficient nejméně $R_{xy,min} = 0,70$ (ČSN 73 6133). Této minimální hodnoty nebylo dosaženo v žádném srovnání, jestliže bylo použito všech dvaceti naměřených párových hodnot. Po výběru 15 párových hodnot už korelační koeficient splňoval normové kritérium při porovnání obou nepřímých metod s metodou přímou. Vyšší lineární závislost byla nalezena při porovnání jamkové metody a rázové zkoušky. Takový výsledek jsem i předpokládal, jelikož měření radiosondou nebylo tolik spolehlivé a opakovaná měření na stejných místech nevykazovala stejné hodnoty. Korelační grafy pro jednotlivá srovnání jsou uvedeny v následujících obrázcích.



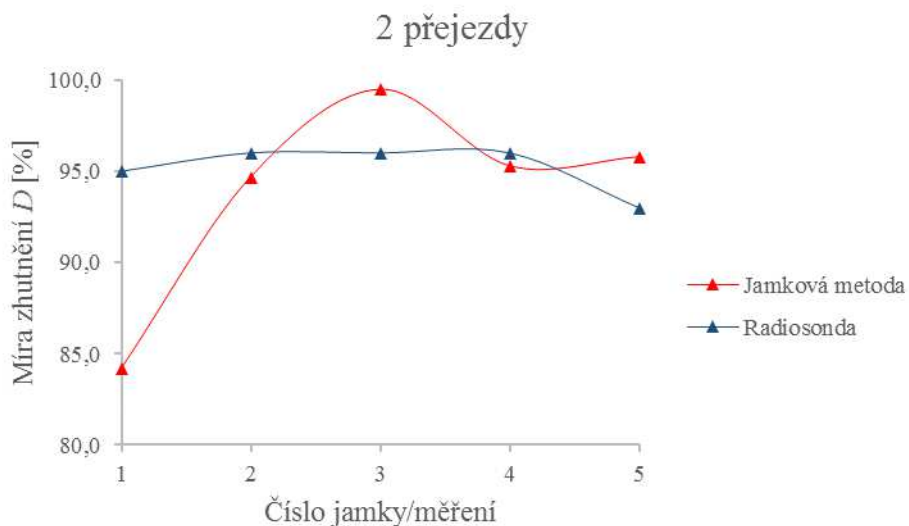
Obrázek 25: Závislost hodnoty míry zhutnění stanovené nepřímou radiometrickou sondou a přímou metodou [0]



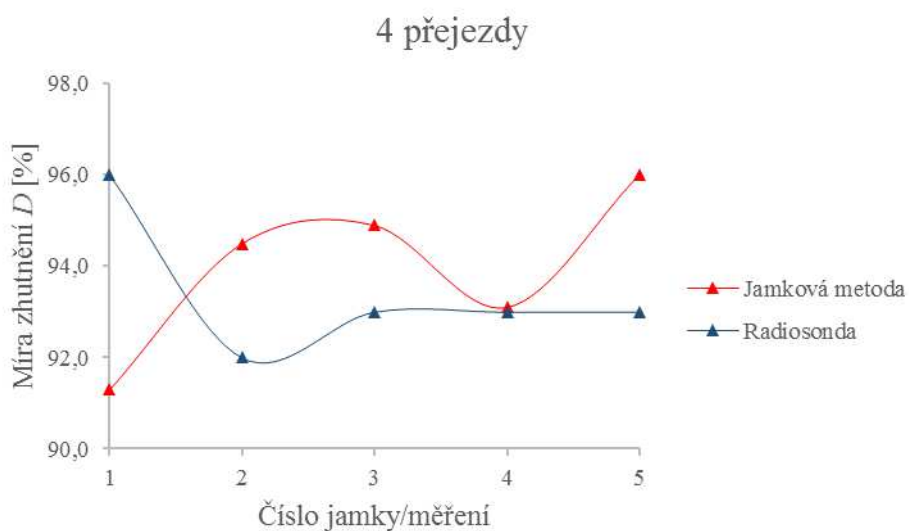
Obrázek 26: Závislost rázového modulu na míře zhutnění stanovené přímou metodou [0]

Pro názornější představu je však mnohem zajímavější grafické srovnání naměřených párových hodnot po jednotlivých přejezdech, zejména v případě porovnání jamkové metody a radiometrického měření. V obou případech se pracuje s objemovou hmotností, která se stanovuje rozdílnými postupy. Grafické srovnání (obrázek 27 až 30) v tomto případě

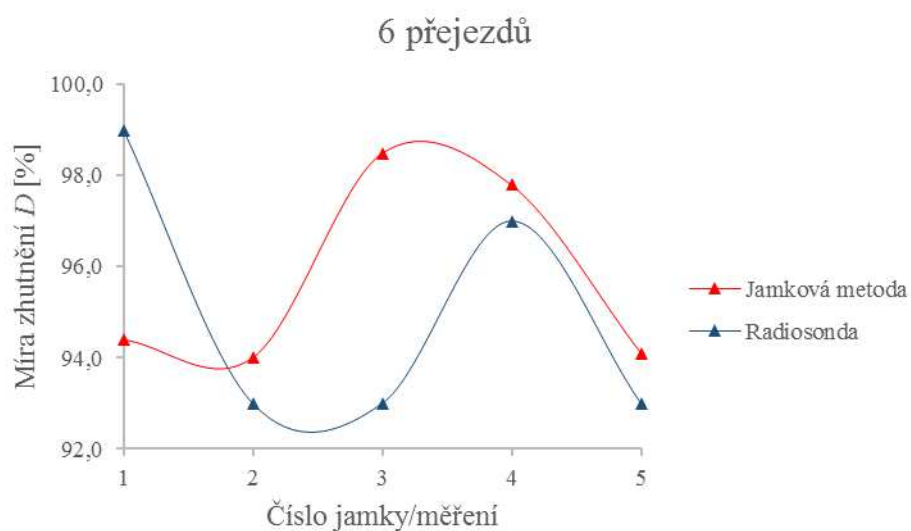
ukazuje na poměrně velké rozdíly mezi naměřenými hodnotami. Nepřímá metoda, kterou je v tomto případě radiometrické měření, může nabídnout určité řešení pro rychlé určení parametrů zhutnění, ale v tomto případě je zavádějící.



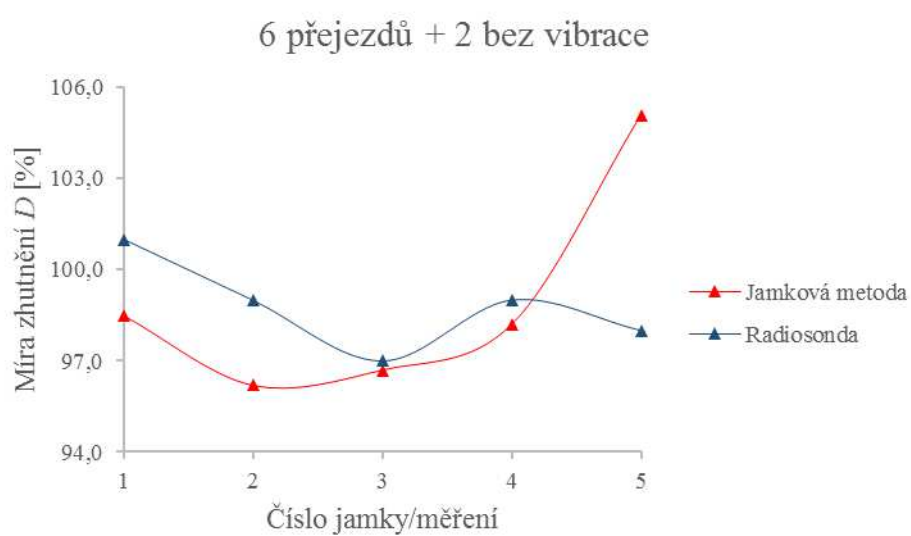
Obrázek 27: Grafické srovnání porovnání přímé a nepřímé metody určení parametru míry zhutnění $D [0]$



Obrázek 28: Grafické srovnání porovnání přímé a nepřímé metody určení parametru míry zhutnění $D [0]$



Obrázek 29: Grafické srovnání porovnání přímé a nepřímé metody určení parametru míry zhutnění D [0]



Obrázek 30: Grafické srovnání porovnání přímé a nepřímé metody určení parametru míry zhutnění D [0]

4.2.9 Zhutňovací zkouška č. 1 – závěr

Výsledky zkoušek CBR byly pro zhutňovací zkoušku č. 1 velmi nepříznivé. Hodnota naměřená po čtyřech dnech zrání (jeden den bez sycení, tři dny s kapilárním sycením) v žádném případě nesplňovala normové kritérium.

Bylo stanoveno $\text{CBR} = 4,5 \%$, přičemž minimální požadavek musí být vyšší než 15% .

Tato skutečnost byla pro posouzení návrhu zásadní a návrh byl shledán neoprávněným. Prokázalo se, že množství pojiva je pro tento druh zeminy nedostatečné. Následně byly výsledky konzultovány s geotechnikem zhotovitele. Příčinou nevyhovujících výsledků byl malý podíl jemných částic. Řešením by mohlo být mísení zeminy s jemnozrnným materiálem, například popílkem, nebo zvýšení dávky pojiva. Zhotovitel se tomuto řešení z ekonomických důvodů bránil. Konečným kompromisem přijatelným pro všechny strany bylo zvýšení dávky pojiva na 6% a zároveň snížení mocnosti upravované vrstvy na $0,3 \text{ m}$.

S těmito parametry bylo nutné celý proces včetně zhutňovací zkoušky opakovat.

4.3 Zhutňovací zkouška č. 2

Termínem pro provedení druhé zhutňovací zkoušky se stal 25. červen 2015. Upravovaná zemina byla opět klasifikována jako špatně zrněný písek (S2 SP).

4.3.1 Realizace zhutňovací zkoušky č. 2

Bylo opět připraveno zkušební pole, kde bylo postupně nadávkováno 6% pojiva Doroport TB25. Vzhledem k přetrvávajícímu suchu, které v tomto období panovalo, byl přídavek vody zvýšen na 25 litrů na čtvereční metr. Kontrolní měření pojiva potvrdilo dávkování naplánovaného množství. Takto připravené pole bylo zpracováno zemní frézou, záběr byl tentokrát upraven na $0,3 \text{ m}$, což potvrdilo měření hloubky promísení. Po srovnání

pole grejdrem bylo umístěno 12 ks měřicích destiček a proveden statický přejezd vibračním válcem. Následovalo provádění laboratorních měření.

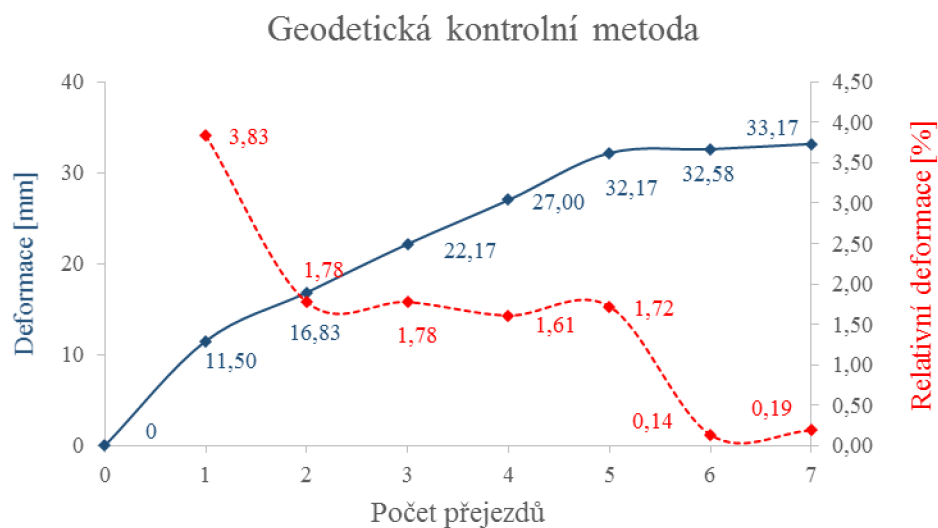
4.3.2 Výsledky provedených měření – geodetická kontrolní metoda

Nivelační měření poklesu zkušebních destiček se provádělo po každém přejezdu vibračního válce. Tentokrát byl při šestém vibračním přejezdu naměřený pokles nižší než 0,5 % tloušťky vrstvy. Po sedmém přejezdu již došlo k narušení povrchu upravené vrstvy, které bylo dokumentováno mírným nárůstem poklesu měřených bodů.

Po osmém přejezdu vibračního válce byla zhutňovací zkouška přerušena. Naměřené hodnoty včetně grafického znázornění jsou uvedeny níže.

Měřený bod	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	průměr
0. přejezd	33	34	37	36,9	36,6	36,5	38,2	41,5	41,5	40,8	42,8	44,7	38,63
1. přejezd	34,3	35,5	38,1	38,2	38	38,4	39,2	42	42	41,9	43,8	45,9	39,78
Δh_1	-13	-15	-11	-13	-14	-19	-10	-5	-5	-11	-10	-12	-11,50
% def.	-4,3	-5	-3,7	-4,3	-4,7	-6,3	-3,3	-1,7	-1,7	-3,7	-3,3	-4,0	-3,83
2. přejezd	35	36,2	38,8	38,8	38,6	38,7	39,7	42,3	42,7	42,3	44,2	46,4	40,31
Δh_2	-7	-7	-7	-6	-6	-3	-5	-3	-7	-4	-4	-5	-5,33
% def.	-2,3	-2,3	-2,3	-2,0	-2,0	-1,0	-1,7	-1,0	-2,3	-1,3	-1,3	-1,7	-1,78
3. přejezd	35,5	36,8	39,3	39,3	39,2	40,4	40,1	42,5	43	42,8	44,5	46,7	40,84
Δh_3	-5	-6	-5	-5	-6	-17	-4	-2	-3	-5	-3	-3	-5,33
% def.	-1,7	-2,0	-1,7	-1,7	-2,0	-5,7	-1,3	-0,7	-1,0	-1,7	-1,0	-1,0	-1,78
4. přejezd	36,4	37,3	39,6	39,7	39,8	40,6	40,9	43,1	43,7	43,3	44,8	46,7	41,33
Δh_4	-9	-5	-3	-4	-6	-2	-8	-6	-7	-5	-3	0	-4,83
% def.	-3,0	-1,7	-1,0	-1,3	-2,0	-0,7	-2,7	-2,0	-2,3	-1,7	-1,0	0	-1,61
5. přejezd	37,3	37,7	39,9	39,9	39,8	42	41,3	43,8	44	43,9	45,1	47,4	41,84
Δh_5	-9	-4	-3	-2	0	-14	-4	-7	-3	-6	-3	-7	-5,17
% def.	-3,0	-1,3	-1,0	-0,7	0	-4,7	-1,3	-2,3	-1,0	-2,0	-1,0	-2,3	--1,72
6. přejezd	37,1	38	40,2	40	40	41,5	41,4	43,8	44	44,1	45,2	47,3	41,86
Δh_6	2	-3	-3	-1	-2	5	-1	0	0	-2	-1	1	-0,42
% def.	0,7	-1,0	-1,0	-0,3	-0,7	1,7	-0,3	0	0	-0,7	-0,3	0,3	-0,14
7. přejezd	37,3	38,2	40,3	40,2	40,2	41,5	41,2	43,4	44,1	44,3	45,3	47,3	41,94
Δh_7	-2	-2	-1	-2	-2	0	2	4	-1	-2	-1	0	-0,58
% def.	-0,7	-0,7	-0,3	-0,7	-0,7	0	0,7	1,3	-0,3	-0,7	-0,3	0	-0,17
Δh_{1-7}	-43	-42	-33	-33	-36	-50	-30	-19	-26	-35	-25	-26	-33,17
% def. 0-7	-14,3	-14,0	-11,0	-11,0	-12,0	-16,7	-10,0	-6,3	-8,7	-11,7	-8,3	-8,7	-11,06

Tabulka 15: Hodnoty naměřené při geodetické kontrolní metodě [0]



Obrázek 31: Graf geodetické kontrolní metody [0]

4.3.3 Výsledky provedených měření – výsledky Proctorovy zkoušky

Vzorky zeminy pro provedení zkoušky Proctor standard byly odebrány po druhém a následně šestém vibračním přejezdu. Hodnota optimální vlhkosti zeminy W_{opt} se snížila z 13 % na 10 %, při současném zvýšení objemové hmotnosti z 1920 kg/m^3 na 2030 kg/m^3 .

Počet přejezdů vibračního válce	Optimální vlhkost W_{opt} [%]	Objemová hmotnost PS [kg/m^3]
2 přejezdy	13,0	1920
6 přejezdů	10,0	2030

Tabulka 16: Naměřené hodnoty objemové hmotnosti [0]

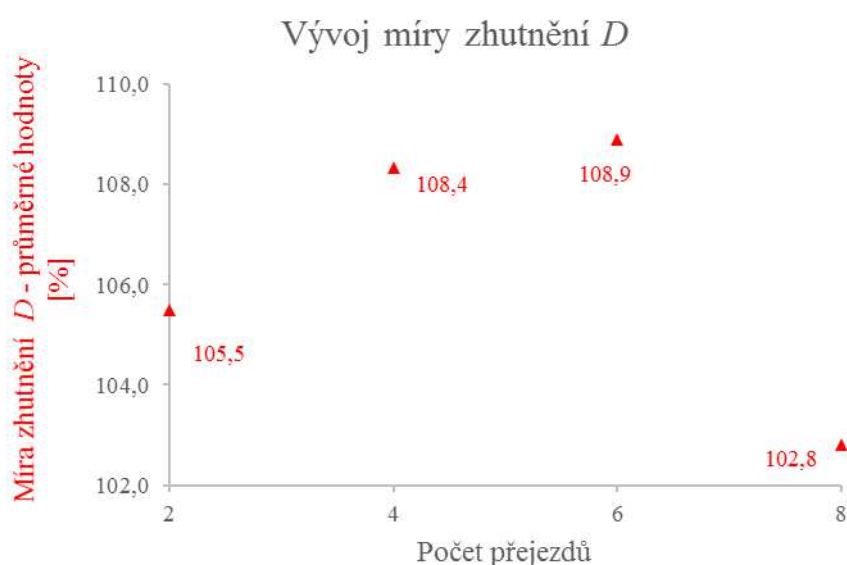
4.3.4 Výsledky provedených měření – stanovení objemové hmotnosti membránovým objemoměrem

Po druhém, čtvrtém, šestém a osmém přejezdu zhutňovacího prostředku se prováděly dvě jamky pro stanovení objemové hmotnosti. Naměřené hodnoty se porovnávaly s maximální objemovou hmotností zjištěnou při Proctorově zkoušce.

Hodnoty míry zhutnění D překračovaly normativní požadavek (100 %) už během prvního měření po druhém vibračním přejezdu. Míra zhutnění po následném čtvrtém a šestém přejezdu stoupala. Osmý přejezd, který způsoboval deformaci povrchu aktivní zóny, stoupající tendenci zastavil a hodnoty naopak klesaly, přesto neklesly pod normativní kritérium.

Počet přejezdů vibračního válce	Míra zhutnění D [%]		
	jamka 1	jamka 2	průměr
2 přejezdy	106,4	104,6	105,5
4 přejezdy	106,4	110,3	108,4
6 přejezdů	108,0	109,8	108,9
8 přejezdů	102,6	103,0	102,8

Tabulka 17: Naměřené hodnoty míry zhutnění D [0]



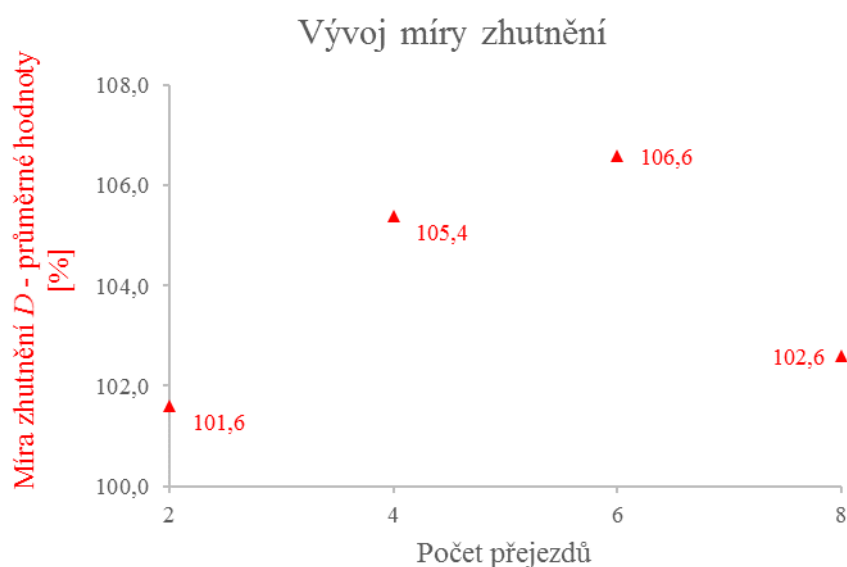
Obrázek 32: Grafické znázornění vývoje parametru míry zhutnění D přímou metodou [0]

4.3.5 Výsledky provedených měření – radiometrické určení parametrů zhutnění

Radiometrické měření se provádělo po každém sudém přejezdu v hloubce 25 cm pod povrchem aktivní zóny. Pro každou z jamek se odebralo jedno měření a další 3 v těsné blízkosti. Zjištěné objemové hmotnosti byly rovněž porovnány s hodnotou naměřenou při zkoušce Proctor standard. Podobně jako v případě membránového objemoměru parametry míry zhutnění D vyhovovaly požadavkům normy ve všech případech.

Počet přejezdů	Míra zhutnění D [%]					
	měření 1	měření 2	měření 3	měření 4	měření 5	průměr
2 přejezdy	102	102	101	101	102	101,6
4 přejezdy	104	105	107	108	103	105,4
6 přejezdů	107	107	107	108	104	106,6
8 přejezdů	101	103	103	103	103	102,6

Tabulka 18: Naměřené hodnoty míry zhutnění D [0]



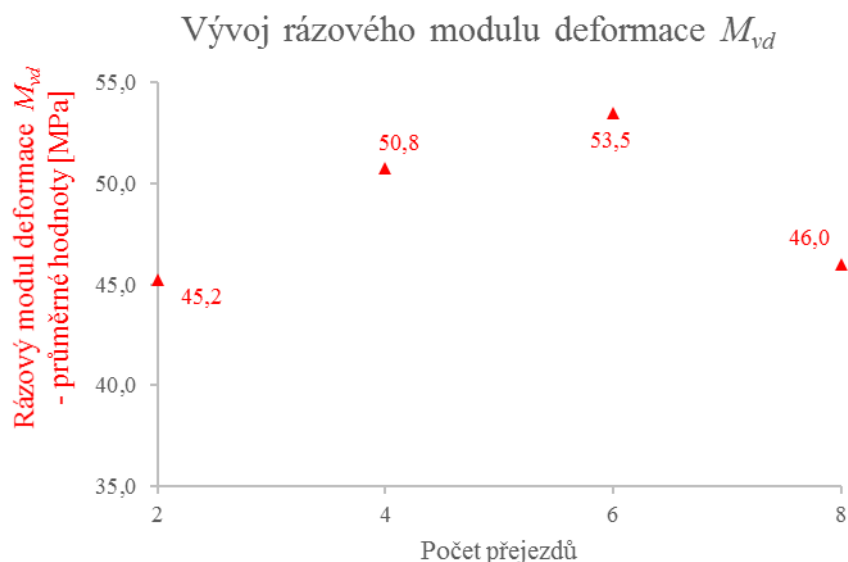
Obrázek 33: Grafické znázornění vývoje parametru míry zhutnění D radiometrickou metodou [0]

4.3.6 Výsledky provedených měření – rázová zatěžovací zkouška lehkou dynamickou deskou

Zkoušky rázovou zatěžovací deskou se při druhé zhutňovací zkoušce prováděly ve stejném režimu jako radiometrická měření, rozdílný byl pouze počet zkoušek, který byl redukován na dvě po každém sudém pojezdu. Oproti prvnímu návrhu se naměřené hodnoty rázového modulu deformace M_{vd} téměř zdvojnásobily. Podobně jako v případě předešlých metod je zde patrný velmi podobný průběh.

Počet přejezdů	Rázový modul deformace M_{vd} [MPa]		
	jamka 1	jamka 2	průměr
2 přejezdy	45,1	45,3	45,2
4 přejezdy	50,3	51,2	50,8
6 přejezdů	53,0	54,0	53,5
8 přejezdů	46,0	46,0	46,0

Tabulka 19: Hodnoty naměřené při rázové zatěžovací zkoušce [0]



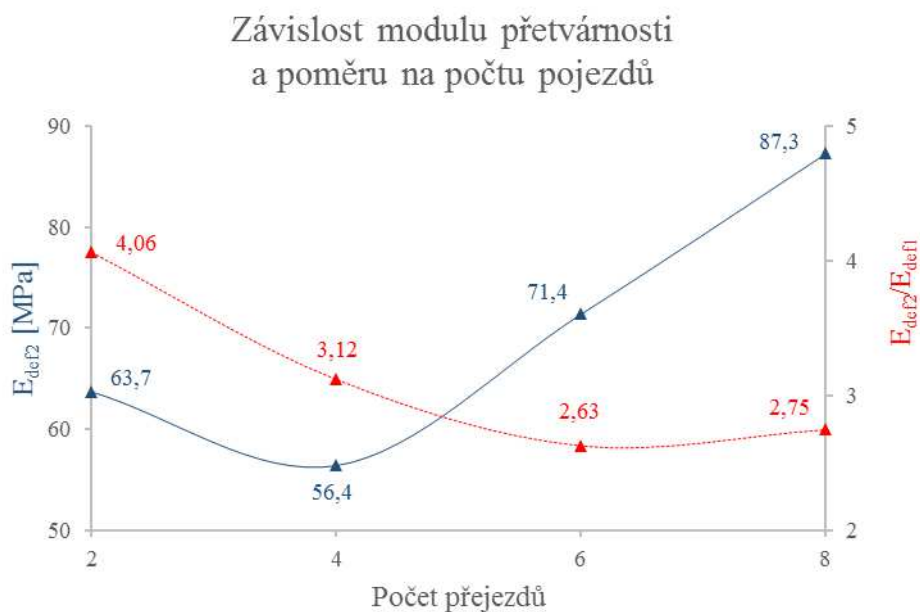
Obrázek 34: Grafické znázornění vývoje hodnot naměřených při rázové zatěžovací zkoušce [0]

4.3.7 Výsledky provedených měření – statická zatěžovací zkouška

Jedno měření po každém přejezdu znamenalo provedení čtyř zkoušek. Zajímavý je menší propad hodnoty modulu přetvárnosti E_{def2} při druhém měření (po čtvrtém přejezdu), přestože poměr klesal. Mírný nástup hodnoty poměru po osmém vibračním přejezdu signalizuje, že vrstva je už dostatečně zhutněná.

Počet přejezdů vibračního válce	E_{def2} [MPa]	E_{def2}/E_{def1}
2 přejezdy	63,7	4,06
4 přejezdy	56,4	3,12
6 přejezdů	71,4	2,63
8 přejezdů	87,3	2,75

Tabulka 20: Hodnoty naměřené při statické zatěžovací zkoušce [0]

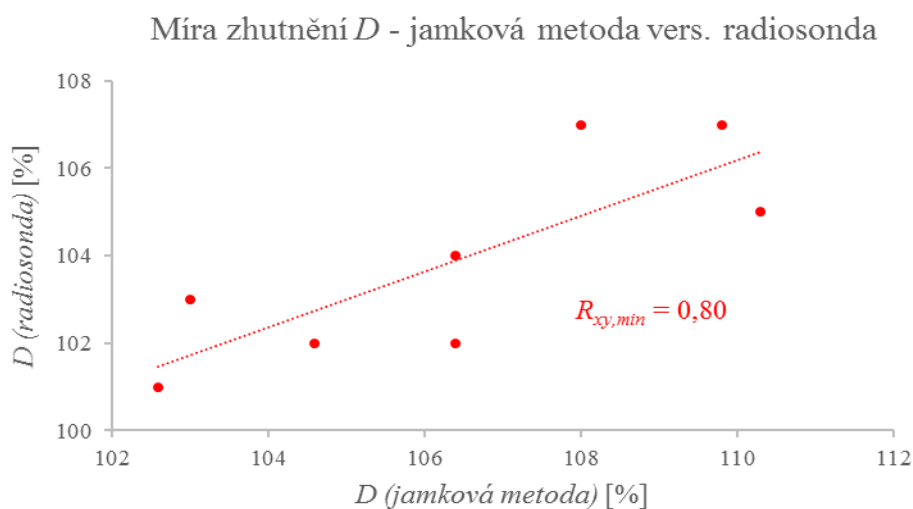


Obrázek 35: Grafické znázornění vývoje hodnot naměřených při statické zatěžovací zkoušce [0]

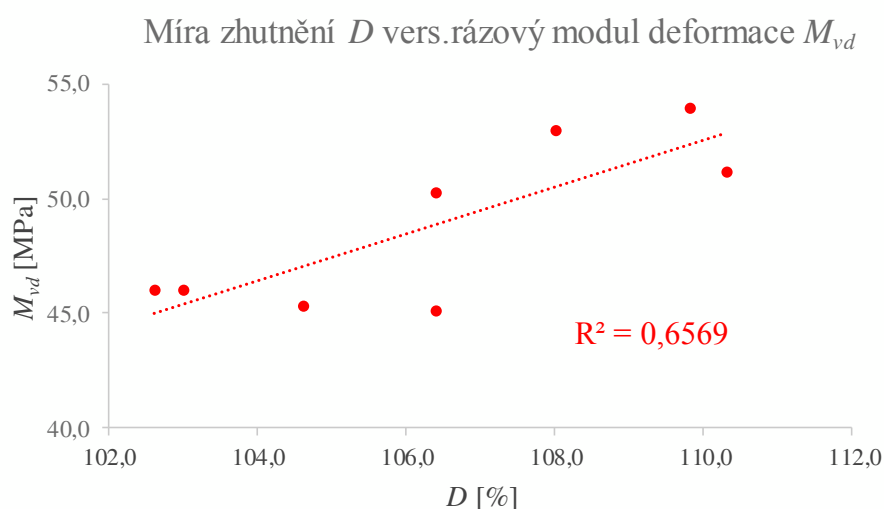
4.3.8 Výsledky provedených měření – porovnání přímých a nepřímých metod parametrů zhutnění

Přestože pro porovnání přímých a nepřímých metod měření nebyl po druhé zhutňovací zkoušce dostatek dat, pokusil jsem se porovnat mezi sebou alespoň čtyři párové hodnoty.

Porovnání hodnot míry zhutnění D a rázového modulu deformace M_{vd} překračuje minimální hodnotu součinitele korelace, stejně tak jako porovnání hodnot míry zhutnění D pomocí přímé jamkové metody a nepřímého radiometrického měření. Abychom lineární závislosti mohli potvrdit, bylo by nutné porovnat více hodnot. V ČSN 72 1006 je zmíněn soubor minimálně 12 párových hodnot.

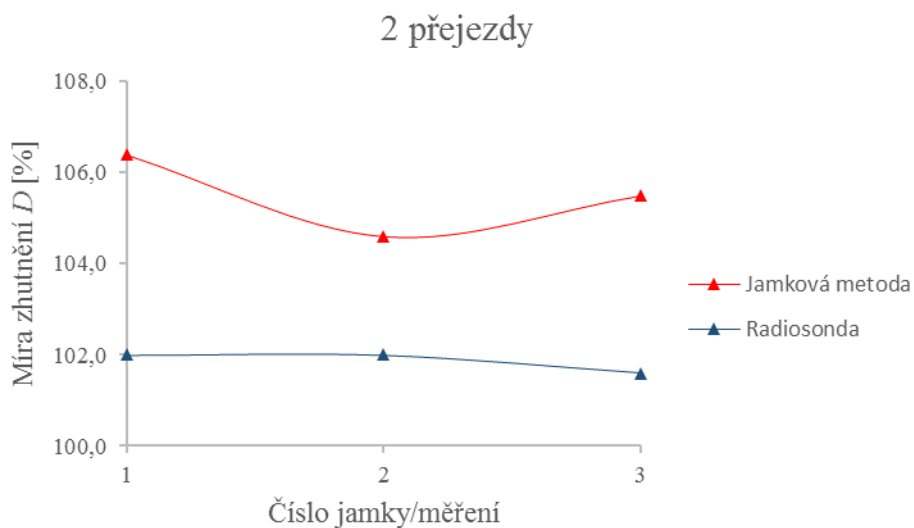


Obrázek 36: Závislost hodnoty míry zhutnění D stanovené nepřímo radiometrickou metodou a přímou metodou [0]

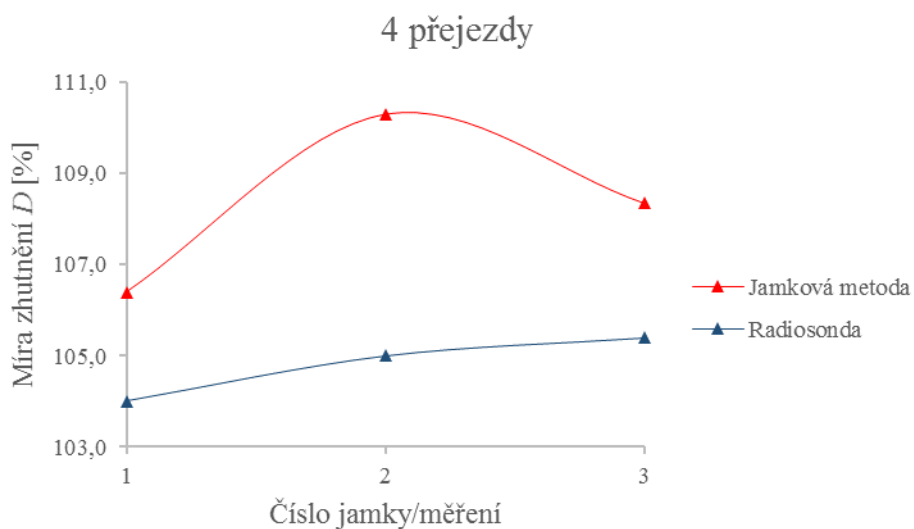


Obrázek 37: Závislost rázového modulu a míry zhutnění stanovené přímou metodou [0]

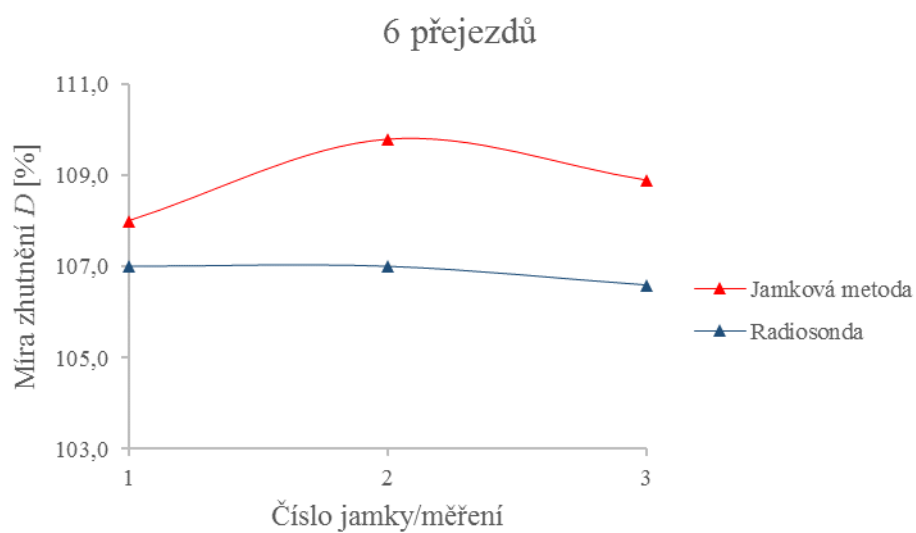
V grafickém porovnání přímé jamkové metody a nepřímé radiosondy jsou patrné vyšší hodnoty naměřené jamkovou metodou a poměrně vyrovnané hodnoty naměřené radiometricky (obrázky 38 až 41).



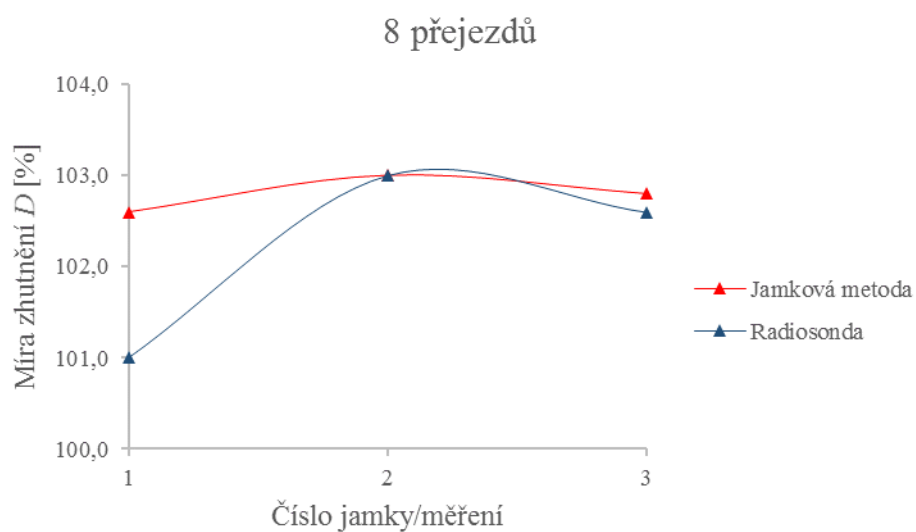
Obrázek 38: Grafické srovnání porovnání přímé a nepřímé metody určení parametru míry zhutnění $D [0]$



Obrázek 39: Grafické srovnání porovnání přímé a nepřímé metody určení parametru míry zhutnění $D [0]$



Obrázek 40: Grafické srovnání porovnání přímé a nepřímé metody určení parametru míry zhutnění $D [0]$



Obrázek 41: Grafické srovnání porovnání přímé a nepřímé metody určení parametru míry zhutnění $D [0]$

4.3.9 Zhutňovací zkouška č. 2 – závěr

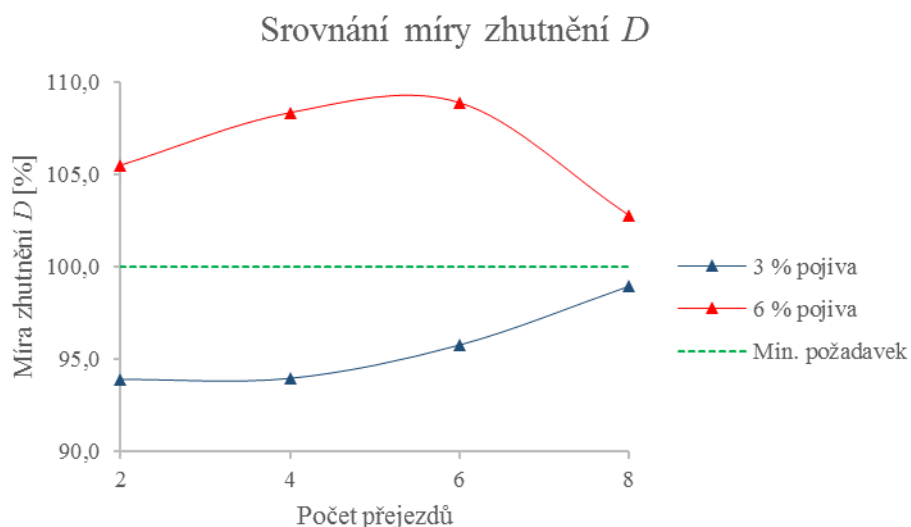
Při srovnání výsledků zhutňovacích zkoušek jsem se soustředil pouze na přímé metody ověřování vlastností, konkrétně na míru zhutnění. Porovnání vychází z průměrných hodnot parametru míry zhutnění D , které byly zjištěny pomocí membránového objemoměru a zkouškou Proctor standard.

Graf odpovídá průběhu obou zhutňovacích zkoušek. V prvním případě (3 % pojiva) míra zhutnění rostla i při osmém přejezdu, ale nebylo dosaženo minimálního požadavku ($D \geq 100 \%$) pro aktivní zónu. Další vibrační přejezdy by už byly kontraproduktivní, z důvodu destrukce povrchu aktivní zóny. Druhý případ (6 % pojiva) se nesl v podobném duchu a osmý vibrační přejezd už byl pro povrch aktivní zóny zničující. V tomto případě však byly splněny požadavky normy již po prvním přejezdu zhutňovacího prostředku.

4.4 Porovnání výsledků zhutňovacích zkoušek

Při srovnání výsledků zhutňovacích zkoušek jsem se soustředil pouze na přímé metody ověřování vlastností, konkrétně o míru zhutnění. Porovnání vychází z průměrných hodnot parametru zhutnění D , které byly zjištěny pomocí membránového objemoměru a zkouškou Proctor standard.

Graf odpovídá průběhu obou zhutňovacích zkoušek. V prvním případě (3 % pojiva) míra zhutnění rostla i při osmém přejezdu, ale nebylo dosaženo minimálního požadavku ($D \geq 100 \%$) pro aktivní zóny. Další vibrační přejezdy by už byly kontraproduktivní, z důvodu destrukce povrchu aktivní zóny. Druhý případ (6 % pojiva) se nesl v podobném duchu a osmý vibrační přejezd už byl pro povrch aktivní zóny zničující. V tomto případě však byly splněny požadavky normy již po prvním přejezdu zhutňovacího prostředku.



Obrázek 42: Grafické porovnání vývoje parametru míry zhutnění D , zjištěných při zhutňovací zkoušce 1 a 2 [0]

4.4.1 Ekonomické srovnání obou návrhů

Ekonomická stránka bývá pro zhotovitele pravidelně jedním z nejdůležitějších aspektů a nejinak tomu nebylo ani při mém experimentu. Je proto na místě porovnat oba dva návrhy. Pro zajímavost přidávám i ceny jiných pojiv.

Je třeba vycházet ze dvou hlavních parametrů. A to jsou cena za 0,5 % pojiva a cena za úpravu zeminy odvíjející se od mocnosti zpracovávané vrstvy. Více v tabulce č. 20 a 21.

Druh pojiva	Cena za každé 0,5 % pojiva [Kč/m ³]
Cement CEMII/B-S 32,5R	26,50
Vápno 90% CaO	27,40
Doroport TB25	28,40
Dorosol C50	28,40

Tabulka 21: Ceník nejběžněji používaných pojiv [0]

Úprava zemin frézou	Cena při záběr 0,3m [Kč/m ³]	Cena při záběru 0,5 m [Kč/m ³]
Wirtgen WR 2500	109,50	82,70

Tabulka 22: Cena za použití zemní frézy [0]

Nejprve je zapotřebí vyjádřit cenu za m^3 upravované zeminy, při daném množství pojiva. V našem případě se jedná o:

- 3 % Doroport TB25 při hloubce záběru frézy 0,5m

$$\rightarrow 82,70 + (6 * 28,40) = 253,1 \text{ Kč}/m^3$$

- 6 % Doroport TB25 při hloubce záběru frézy 0,3 m

$$\rightarrow 109,50 + (12 * 28,4) = 450,3 \text{ Kč}/m^3$$

Následně se přepočítá cena na m^2 :

- 3 % Doroport TB25 při hloubce záběru frézy 0,5 m

$$\rightarrow 253,1 * 0,5 = 126,55 \text{ Kč}/m^2$$

- 5 % Doroport TB25 při hloubce záběru frézy 0,3 m

$$\rightarrow 450,3 * 0,3 = 135,09 \text{ Kč}/m^2$$

Z výše uvedeného vyplývá, že rozdíl ceny za jednotku (m^2) činí 8,54 Kč. Pochopitelně při velkých objemech zemních prací na stavbách dopravní infrastruktury rozdíl lineárně roste, ale cena za jednotku je přibližně srovnatelná. V našem případě šlo určitě o dobrou investici.

5. Závěr

Během celého experimentu bylo provedeno téměř 120 laboratorních zkoušek několika druhů a metod. Hlavním úkolem experimentu bylo nalezení vhodného návrhu úpravy zemin aktivní zóny. Pro ověření návrhu posloužila zhutňovací zkouška, která se prováděla podle ČSN 72 1006 a její přílohy D. Při vyhodnocování výsledků byl kladem důraz na hodnoty metod přímých měření, zejména na parametr zhutnění D a hodnotu kalifornského poměru únosnosti CBR .

Návrh, při kterém byla upravovaná vrstva mocnosti 0,3 metry s přídavkem 6 % hydraulického silničního pojiva Doroport TB25, byl potvrzen jako oprávněný. Ve všech případech přímých zkoušek (celkem 9) byly výsledky vyhovující.

Rovněž hodnoty v případě radiometrického měření a rázové dynamické zkoušky, čili nepřímých metod měření, byly při porovnání orientačních hodnot (ČSN 721006) vyhovující (celkem 24). Výsledky statické zatěžovací zkoušky by po 8. přejezdu vyhovovaly podle platného kontrolního a zkušebního plánu stavebního objektu. Přesto výsledky nepřímých měření nelze přeceňovat. Rázová dynamická deska se dnes používá při kontrole zhutnění menších prací, například obsypů. Pro kontrolu větších celků (aktivní zóny, násypy apod.) je nutné mít maximální jistotu, což v současné době přináší přímé metody měření únosnosti zemin.

Mé doporučení je využít poznatky z návrhu při dalším pokračování zemních prací na stavbě „Silnice I/11 Ostrava - Prodloužená Rudná“. Ovšem pouze v případě, kdy půjde o stejný typ zeminy. Možná by stálo za úvahu, z ekonomického hlediska, provést návrh s použitím 5 nebo 5,5% množství pojiva za jinak stejných okrajových podmínek. Upravenou zeminu doporučuji hutnit v režimu šesti vibračních přejezdů a na závěr jedním bez vibrace. Je nezbytné, aby hutnění prováděl stejný druh zhutňovacího prostředku jako v případě zhutňovací zkoušky.

Úprava zemin pojivy je ověřenou metodou. Neustále však platí nutnost sledování vlastností a složení zeminy a individuálního přístupu pro jednotlivé druhy zeminy.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Doc. RNDr. Františku Krestovi, Ph.D. za poskytnuté cenné rady, čas, připomínky a informační zdroje. Dále děkuji svému zaměstnavateli za možnost účastnit se návrhu na úpravu zeminy a zaměstnancům laboratoře TPA ČR, pobočka Ostrava, především Ing. Martinu Brabcovi a Ing. Vladimíře Pchálkové. Rovněž děkuji své rodině a blízkým za jejich podporu během celé doby mého studia.

Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [0] Autorské fotografie a tabulky
- [1] HORÁČEK, Vít. *Úprava zemin vápnem a hydraulickými silničními pojivy*. Ostrava, 2014. Bakalářská práce.
- [2] CORTÉ, Jean-Francois. *Soil treatment with lime and / or hydraulic binders. Application to the construction of fills and capping layers*. Paris: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2004. ISBN 27-208-0353-7.
- [3] ČSN EN 13282-1. *Hydraulická silniční pojiva - Část 1: Rychle tvrdnoucí hydraulická silniční pojiva – Složení, specifikace a kritéria shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [4] ČSN EN 13286-2. *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy: Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti - Proctorova zkouška*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [5] ČSN EN 13286-47. *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [6] ČSN EN 14 227-11. *Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 11: Zeminy upravené vápnem*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [7] ČSN EN 14 227-13. *Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 13: Zeminy upravené hydraulickými silničními pojivy*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [8] ČSN 72 1006. *Kontrola zhutnění zemin a sypanin*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [9] ČSN 72 1010. *Stanovení objemové hmotnosti zemin. Laboratorní a polní metody*. Praha: Český normalizační institut, 1991
- [10] ČSN 73 6133. *Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

- [11] ČSN 736192. *Rázové zatěžovací zkoušky vozovek a podloží*. Praha: Český normalizační institut. 1996
- [12] EICHLER, Jaroslav, Kamila WEIGLOVÁ a Věra MACEKOVÁ. *Mechanika zemin a zakládání staveb*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981, 150 s.
- [13] KRESTA, František. *Technické podmínky staveb pozemních komunikací TP94. Úprava zemin*. Praha: Ministerstvo dopravy, odbor pozemních komunikací, 2013.
- [14] KROBOT, Pavel. G-Consult. *Ostrava – Silnice I/11 Prodloužená Rudná – podrobný GTP: Závěrečná zpráva*. Ostrava, 2005.
- [15] MOHYLA, Marek. *Silniční a geotechnická laboratoř*. Ostrava, 2014.
- [16] PUIATTI, Daniel. Soil treatment in Europe: development, last improvements, European standardization. In: *Seminář Úpravy zemin při zemních pracích na pozemních komunikacích*. Praha: Arcadis, 2014, s. 21-30.
- [17] SCHADE, Hans-Werner. Untersuchungen zum Reaktionsverhalten von Mischbindemitteln zur Bodenbehandlung. *Strasse und Autobahn*. Bonn: Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, 2006, **2006**(9): 541-547.
- [18] Speciální hydraulická pojiva. [Http://www.cemex.cz](http://www.cemex.cz) [online]. © 2015 [cit. 2015-11-23]. Dostupné z: <http://www.cemex.cz/specialni-hydraulicka-pojiva.aspx>
- [19] ROGERS, C, S GLENDINNING a N DIXON. *Lime stabilisation: proceedings of the seminar held at Loughborough University Civil*. London: Thomas Telford, 1996, 183 p. ISBN 07-277-2563-7.

Seznam použitých obrázků

- Obrázek 1: Zemní fréza Wirtgen WR2000 [0]
- Obrázek 2: Křivka zrnitosti [0]
- Obrázek 3: Orientační vymezení oblasti zrnitosti pro úpravu zemin. [17]
- Obrázek 4: Zkušební pole při zhutňovací zkoušce [0]
- Obrázek 5: Schéma zkušebního pole dle ČSN 72 1006 [8]
- Obrázek 6: Vibrační válec při hutnění zkušebního pole [0]
- Obrázek 7: Dávkování pojiva [0]
- Obrázek 8: Mísení zeminy s pojivem pomocí zemní frézy [0]
- Obrázek 9: Statická zatěžovací zkouška [0]
- Obrázek 10: Čtení hodnot ze stupnice membránového objemoměru [0]
- Obrázek 11: Křivka zhutnitelnosti [0]
- Obrázek 12: Příprava otvoru pro zářič radiosondy [0]
- Obrázek 13: Zasunutí zářiče radiosondy (hl. 25 cm) [0]
- Obrázek 14: Rázová zkouška lehkou dynamickou deskou [0]
- Obrázek 15: Fröwag lis na CBR [15]
- Obrázek 16: Statická zatěžovací zkouška [0]
- Obrázek 17: Zemní fréza ve spojení s kropičkou při mísení zeminy [0]
- Obrázek 18: Graf geodetické kontrolní metody [0]
- Obrázek 19: Grafické znázornění vývoje objemové hmotnosti stanovené přímou metodou [0]
- Obrázek 20: Grafické znázornění vývoje parametru zhutnění D [0]
- Obrázek 21: Grafické znázornění vývoje objemové hmotnosti na základě měření radiometrickou metodou [0]
- Obrázek 22: Grafické znázornění vývoje parametru zhutnění D [0]
- Obrázek 23: Grafické znázornění vývoje hodnot rázového modulu naměřených při rázové zatěžovací zkoušce [0]
- Obrázek 24: Grafické znázornění vývoje hodnot naměřených při statické zatěžovací zkoušce [0]
- Obrázek 25: Závislost hodnoty míry zhutnění stanovené nepřímou radiometrickou sondou a přímou metodou [0]
- Obrázek 26: Závislost rázového modulu na míře zhutnění stanovené přímou metodou [0]
- Obrázek 27: Grafické srovnání porovnání přímé a nepřímé metody určení parametru míry zhutnění D [0]

- Obrázek 28: Grafické srovnání porovnání přímé a nepřímé metody určení parametru míry zhutnění D [0]
- Obrázek 29: Grafické srovnání porovnání přímé a nepřímé metody určení parametru míry zhutnění D [0]
- Obrázek 30: Grafické srovnání porovnání přímé a nepřímé metody určení parametru míry zhutnění D [0]
- Obrázek 31: Graf geodetické kontrolní metody [0]
- Obrázek 32: Grafické znázornění vývoje parametru míry zhutnění D přímou metodou [0]
- Obrázek 33: Grafické znázornění vývoje parametru míry zhutnění D radiometrickou metodou [0]
- Obrázek 34: Grafické znázornění vývoje hodnot naměřených při rázové zatěžovací zkoušce [0]
- Obrázek 35: Grafické znázornění vývoje hodnot naměřených při statické zatěžovací zkoušce [0]
- Obrázek 36: Závislost hodnoty míry zhutnění D stanovené nepřímo radiometrickou metodou a přímou metodou [0]
- Obrázek 37: Závislost rázového modulu a míry zhutnění stanovené přímou metodou [0]
- Obrázek 38: Grafické srovnání porovnání přímé a nepřímé metody určení parametru míry zhutnění D [0]
- Obrázek 39: Grafické srovnání porovnání přímé a nepřímé metody určení parametru míry zhutnění D [0]
- Obrázek 40: Grafické srovnání porovnání přímé a nepřímé metody určení parametru míry zhutnění D [0]
- Obrázek 41: Grafické srovnání porovnání přímé a nepřímé metody určení parametru míry zhutnění D [0]
- Obrázek 42: Grafické porovnání vývoje parametru míry zhutnění D , zjištěných při zhutňovací zkoušce 1 a 2 [0]

Seznam použitých tabulek

- Tabulka 1: Rozdělení složek podle velikosti zrn [10]
- Tabulka 2: Výchozí rozdělení skupin zeminy [10]
- Tabulka 3: Použitelnost zemin pro stavbu zemního tělesa [10]

- Tabulka 4: Orientační hodnoty změn vlastností zeminy vztažené na 1 % příměsi pojiva [13]*
- Tabulka 5: Kontrolní zkoušky na zemní pláni pro zeminy upravené (viz tab. 11 ČSN 73 6133) [10]*
- Tabulka 6: Kontrolní zkoušky při provádění a po dokončení zemního tělesa z upravených zemin [13]*
- Tabulka 7: Hodnoty naměřené při geodetické kontrolní metodě [0]*
- Tabulka 8: Naměřené hodnoty objemové hmotnosti [0]*
- Tabulka 9: Naměřené hodnoty objemové hmotnosti [0]*
- Tabulka 10: Naměřené hodnoty míry zhutnění D [0]*
- Tabulka 11: Naměřené hodnoty objemové hmotnosti [0]*
- Tabulka 12: Naměřené hodnoty míry zhutnění D [0]*
- Tabulka 13: Hodnoty rázového modulu naměřené při rázové zatěžovací zkoušce [0]*
- Tabulka 14: Výsledky statické zatěžovací zkoušky [0]*
- Tabulka 15: Hodnoty naměřené při geodetické kontrolní metodě [0]*
- Tabulka 16: Naměřené hodnoty objemové hmotnosti [0]*
- Tabulka 17: Naměřené hodnoty míry zhutnění D [0]*
- Tabulka 18: Naměřené hodnoty míry zhutnění D [0]*
- Tabulka 19: Hodnoty naměřené při rázové zatěžovací zkoušce [0]*
- Tabulka 20: Hodnoty naměřené při statické zatěžovací zkoušce [0]*
- Tabulka 21: Ceník nejběžněji používaných pojiv [0]*
- Tabulka 22: Cena za použití zemní frézy [0]*

Seznam příloh:

Příloha I: Program zhutňovací zkoušky



Program zhutňovací zkoušky

Navrhování a provádění zemních těles pozemních komunikací ČSN 73 6133

Stavba: Silnice I/11, Prodloužená Rudná – hranice okresu Opava

Datum zhutňovací zkoušky: 17. 4. 2015

Místo zkoušky: SO 101

Materiál: Zemina upravená hydraulickými silničními pojivy
ČSN EN 14 227-13

Zdroj sypaniny: Písek špatně zrněný, třída S2

Použité pojivo: Doroport TB 25

Cíl zkoušky:

Na základě výsledků zhutňovací zkoušky bude ověřen počet pojezdů a režim hutnění vibračním válcem tak, aby byly dosaženy požadované hodnoty míry zhutnění. Zhutňovací zkouškou budou rovněž stanoveny nejvhodnější zkušební metody.

Zkoušená vrstva: Aktivní zóna

Staničení: km 12.500 – 12.800

Zkušební pole:

Bude vytvořeno jedno zkušební pole s následujícími parametry:

Rozměry zkušebního pole: šířka 8 m, délka 30 m.

Rozměry zkušebního dvorce: šířka 2 m, délka 10 m.

Rozměry zkušebního pruhu: šířka 2,2 m (světlost hnací nápravy VV), délka 25 m.

Počet měřených bodů:

12 kovových destiček (osová vzdálenost 1,5 m)

Hutnící mechanizace:

Vibrační válec STA VV2010D, hmotnost 21.000 kg, šířka běhounu 2,2 m.

Druh geotechnických zkoušek:

- statická zatěžovací zkouška dle ČSN 72 1006, příloha A
- radiometrické určení parametrů míry zhutnění dle ČSN 73 1375 a ČSN 72 1006, příloha F
- geodetická kontrolní metoda dle ČSN 72 1006, příloha G
- stanovení objemové hmotnosti zemin dle ČSN 72 1010, metoda D-1, stanovení membránovým objemoměrem
- proctorova zkouška, dle ČSN EN 13286-2
- rázová zatěžovací zkouška lehkou dynamickou deskou dle ČSN 73 6192, metoda C

Postup prací:

1. Vrstva neupravené zeminy bude srovnána a upravena. Na takto upraveném poli bude nadávkováno pojivo Doroport TB25 (ČSN EN 13 282-2, výrobce Cemex ČR). Zhotovitelem je navrženo dávkování 3 %. Zemina na zkušebním poli bude zpracována jedním přejezdem zemní frézy s hloubkou záběru 0,5 m. Následně budou odebrány vzorky k ověření geotechnických vlastností (vlhkost, objemová hmotnost, apod.). Poté bude zkušební pole srovnáno a provede se srovnávací přejezd vibračním válcem.
2. Provede se osazení měřících bodů (12× ocelová destička) a jeden statický přejezd vibračním válcem (VV) bez vibrace (nulový pojezd).
3. Bude provedeno geodetické zaměření bodů.
4. Provede se 1. přejezd VV.
5. Bude provedeno geodetické zaměření bodů.
6. Provedou se další přejezdy VV s vibrací. Geodetické zaměření se provede po každém vibračním přejezdu.
7. Po 2., 4., 6., popř. 8. přejezdu, budou odebrány vzorky (objemová hmotnost PS) a provedeno měření (SZZ, 5× radiosonda, 5× jamka, 5× LDD).
8. Zkouška bude ukončena dle výsledků geodetického zaměření - po dvou pojezdech nesmí být překročena hodnota o 0,5 % z mocnosti zhutněné vrstvy tj. 2,5 mm.
9. Na závěr budou opět odebrány vzorky a provedeno měření (viz bod č. 7).

O provedení zhutňovací zkoušky, odběrech vzorků, měření a jejich základním vyhodnocení bude zpracována dokumentace.

V Ostravě dne 11. 4. 2015
Vypracoval: Vít Horáček